

Nota de Investigación/Research Note

Multiannual shoreline response along the coast of Rosarito, Baja California, Mexico

Respuesta multianual de la playa en la costa de Rosarito, Baja California, México

JR Lizárraga-Arciniega*, A Martínez-Díaz-de-León, CR Torres-Navarrete, LA Galindo-Bect

Instituto de Investigaciones Oceanológicas, Universidad Autónoma de Baja California, Km 107 Carretera Tijuana-Ensenada, Ensenada, CP 22830, Baja California, México. E-mail: jroman@uabc.mx

Abstract

The long-term rate of beach change can be estimated by analyzing historical shoreline positions deduced from aerial photographs and maps, though in some cases a systematic beach profile survey is preferable because it allows the detailed observation of its evolution. Between June 1997 and December 2006, 925 beach profiles were surveyed monthly in the area of Rosarito, Baja California, thus constructing the longest time series known for any beach in Mexico. Monthly sand volume was estimated to determine the multiannual changes. When these multiannual changes were superimposed on the seasonal changes during the study period, distinct erosion/accretion patterns were found: in the northern segment of the shoreline surveyed, the long-term trend was not detectable or showed low values, indicating a condition of relative stability; in the southern segment, the long-term trend was accretional at all except for one of the control points, with a mean value of $9.1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ year}^{-1}$ and an increase in sand volume of 22% to 78% relative to the initial volume, which could be associated with the sediment discharged by streams flowing into the southern part of the study area and with variations in the spatial distribution of wave energy.

Key words: Baja California, beach erosion/accretion, beach profiles, long-term trend.

Resumen

La tasa de cambio de una playa en el largo plazo se puede estimar analizando las posiciones históricas de la línea de playa derivada de fotografías aéreas y mapas. Sin embargo, en algunos casos es preferible el levantamiento sistemático de perfiles de playa debido a que éste permite la observación particularizada de la evolución de la misma. Con esta técnica se levantaron 925 perfiles mensuales de playa entre junio de 1997 y diciembre de 2006 en la zona de Rosarito, Baja California, construyendo así la serie de tiempo de perfiles de playa más larga que se conocen para alguna playa de México. Se estimó el volumen de arena mensual para determinar los cambios multianuales. Al sobreponer estos cambios multianuales con los estacionales en el periodo de medición se encontraron los siguientes patrones distintivos de erosión/acreción: en las playas del norte no se encontró una tendencia de largo plazo detectable, o los bajos valores obtenidos indicaron una condición relativamente estable; en las playas del sur la tendencia de largo plazo fue acrecional en todos los puntos de control (excepto en uno) alcanzando un promedio de $9.1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ año}^{-1}$, con incrementos de volumen de arena desde 22% a 78% con respecto al volumen inicial, lo cual puede estar asociado a las descargas de sedimento por los arroyos que desembocan en la parte sur del área de estudio y potencialmente a variaciones en la distribución espacial de la energía de las olas.

Palabras clave: Baja California, erosión/acreción de playa, perfiles de playa, tendencia de largo plazo.

Introduction

Knowledge and understanding of beach morphology changes is of particular interest to coastal engineers and managers. To predict beach behaviour and improve shoreline management it is necessary to constantly observe and measure its variability. The larger the number of measuring points and the longer the measuring period, the greater the possibility of appropriately describing the patterns of beach changes in diverse temporal and spatial scales.

One of the most important characteristics of a beach is its long-term rate of change, which can be estimated by analyzing historical shoreline positions obtained from maps or, more commonly, from aerial photographs. Nevertheless, this type of

Introducción

Resulta de particular interés para los ingenieros y administradores de la zona costera conocer y entender los cambios morfológicos de las playas. Para anticipar el comportamiento de las playas y mejorar su potencial de aprovechamiento como recursos costeros, es necesario mantener una constante observación y medición de su variabilidad. Mientras más puntos de medición se tengan y mayor sea el periodo de medición, mayor será la posibilidad de describir adecuadamente los patrones de cambio de la playa en las diversas escalas temporales y espaciales.

Una de las características más importantes a determinar en una playa es su tasa de cambio en el largo plazo, la cual se

analysis presents some disadvantages. On the one hand it is difficult to select, consistently, the indicator defining the shore-line position and, on the other, it is also difficult to choose the method for obtaining the data and the type of analysis to be used to estimate the long-term trend, since the change in shore-line position is usually not gradual (Crowell *et al.* 1991).

When estimating the long-term trend in beach change it is advisable to consider the natural variations in relatively short time periods (e.g., monthly), since large-scale fluctuations in the volume of beach sand caused by individual storms hinder the evaluation and differentiation of seasonal or multiannual changes (Fenster *et al.* 2001). Analyses of beach profiles measured periodically in time lapses of one or more decades have shown that short-term changes can be of equal or greater magnitude than long-term changes (Bokuniewicz 1981, Eliot and Clarke 1989). The use of beach profiles is recommendable despite the elevated costs that may be incurred of obtaining them over long periods of time.

Few coastal countries in the world run permanent beach monitoring programs. In Mexico, there is a lack of information on beach changes along its extensive shoreline, and annual or subannual records are only available for a few sites. In an attempt to initiate a long-term monitoring program, monthly beach surveys have been conducted during the past 10 years in Rosarito, Baja California, to determine and document shoreline change patterns. To our knowledge, this is the most complete and longest database of any Mexican beach. This study aims to quantify the multiannual beach changes and determine the long-term trend of the Rosarito shoreline.

Study area

Rosarito is located on the northwest coast of the Baja California peninsula, some 15 km south of the US-Mexico border. The shoreline under study is about 11 km long. In the central part, several rocky breakwaters form part of the cooling water intake structure of a thermoelectric plant. As the breakwaters interrupt the littoral sediment transport and the shoreline morphology has notably different characteristics, the beaches on both sides of the structures were considered independently in this study (fig. 1).

To the north of the breakwaters (northern segment), the shoreline is relatively narrow and consists of a mixture of sand, gravel, and pebbles, with an underlying rocky shelf that is exposed during intense erosion conditions. Seawalls protect the bluffs on which the residential infrastructure sits (fig. 2).

To the south of the breakwaters (southern segment), the shoreline is wider and the bluffs disappear. Isolated seawalls protect the property, occasionally interacting with waves. Unlike the northern segment, the shoreline is composed entirely of sand. Two streams (Guagatay and Rosarito) flow into the southernmost part of this segment primarily during winter.

The Coronado Islands are located 14 km off Rosarito. The largest of these three islands is 3.3 km long and the smallest

puede estimar analizando las posiciones históricas de la línea de costa mediante mapas o más comúnmente en fotografías aéreas. Este tipo de análisis presenta algunas desventajas: por un lado se dificulta ser consistente en seleccionar el indicador que define la posición de línea de playa y, por otro, también es difícil escoger la técnica para obtener los datos y el tipo de análisis a utilizar para estimar la tendencia de largo plazo, ya que el cambio de la posición de la línea de playa usualmente no es gradual (Crowell *et al.* 1991).

Para estimar la tendencia del cambio de una playa en el largo plazo conviene considerar las variaciones naturales en periodos relativamente cortos (e.g. mes a mes), ya que las fluctuaciones de gran magnitud en el volumen de arena de playa ocasionadas por tormentas individuales hacen difícil evaluar y distinguir entre los cambios de carácter estacional o multiannual (Fenster *et al.* 2001). A partir del análisis de perfiles de playa medidos periódicamente por periodos de una o más décadas, se ha determinado que los cambios de corto plazo pueden ser de igual o mayor magnitud que los cambios a largo plazo (Bokuniewicz 1981, Eliot y Clarke 1989); sin embargo, es preferible el uso de perfiles de playa aunque su obtención durante largos periodos de tiempo pudiera resultar mucho más costosa.

Son pocos los países costeros del mundo que operan programas permanentes para medir la evolución de sus playas. En México es común la falta de información sobre los cambios de las playas a lo largo de sus extensos litorales y pocos sitios disponen de registros subanuales o anuales. En un esfuerzo por iniciar un programa de monitoreo de largo plazo, en Rosarito, Baja California, se ha llevado a cabo el levantamiento mensual de perfiles de playa durante los últimos 10 años, con el objeto de reconocer y documentar sus patrones de cambio. Para el conocimiento de los autores, esta base de datos es la más completa y larga para una playa mexicana y por lo tanto resulta de gran importancia por su carácter único. El objetivo de este trabajo fue cuantificar los cambios de playa de carácter multiannual y determinar la tendencia de largo plazo de la playa en Rosarito, Baja California.

Área de estudio

Rosarito se localiza en la costa noroeste de Baja California, 15 km al sur de la frontera México-EUA. El litoral de estudio tiene una extensión de aproximadamente 11 km, en cuya parte central se localizan varios espigones de enrocamiento que conforman la toma de agua para el sistema de enfriamiento de una planta termoeléctrica. Debido a que los espigones interrumpen el transporte litoral de sedimento y la morfología litoral tiene características notablemente diferentes, las playas a ambos lados de estas estructuras se consideraron de manera independiente para este estudio (fig. 1).

Al norte de las estructuras (segmento norte), la playa es relativamente angosta, compuesta por una mezcla variable de arena, grava y cantos rodados, con una plataforma rocosa subyacente que queda expuesta durante condiciones de erosión intensa. Presenta, además, cantiles sobre los que se asientan

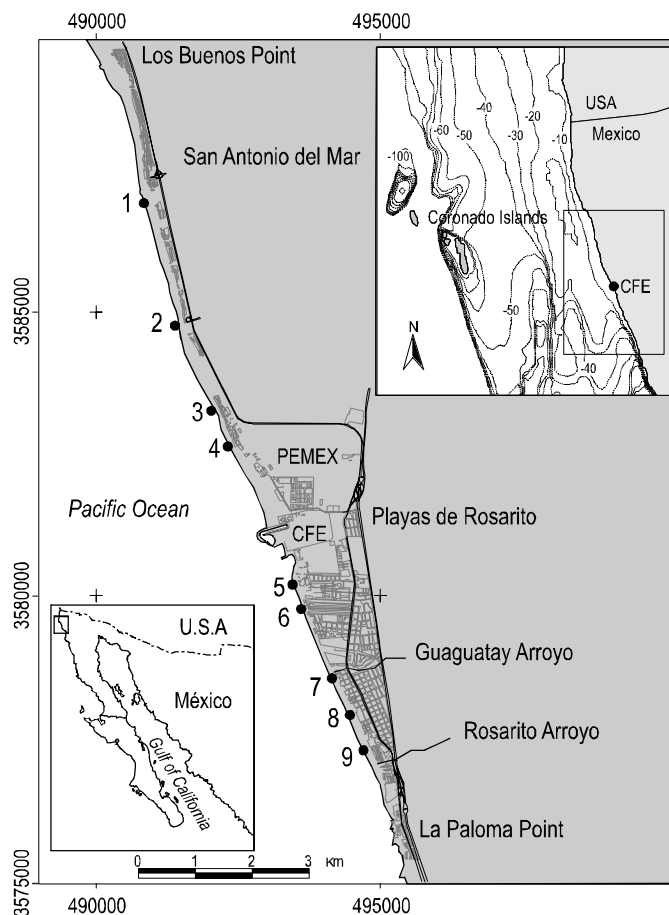


Figure 1. Study area, showing the location of control points 1 to 4 in the northern segment of the Rosarito (Baja California, Mexico) shoreline and control points 5 to 9 in the southern segment. The inset shows the bathymetric contours (in meters) off the study area.

Figura 1. Área de estudio. El segmento norte de playa comprende los puntos de control 1 al 4 mientras que el segmento sur de playa, los puntos de control 5 al 9. El recuadro muestra los contornos batimétricos (en metros) frente a la zona de estudio.

only 1 km in length. These islands are oriented N-NW facing open-sea waves that approach from the NW and W-SW. The sea floor between the islands and the mainland has a relatively gentle slope. The isobaths are arranged like a tongue, indicating that the islands are responsible for a significant transformation of the waves in regard to height and direction, creating a zone protected from the open sea (Martínez-Díaz-de-León 2002) (fig. 1, inset).

Methods

For the monthly beach profile surveys, nine sites were selected as control points (fig. 1). Measurements began in June 1997 at control points 1, 3, 5, and 9, and in January 1998 at control points 2, 4, 6, 7, and 8, and have continued to date; however, only the information generated until June 2006 is analyzed in this paper.

instalaciones residenciales que se encuentran protegidas con muros costeros (fig. 2).

En el segmento sur (al sur de las estructuras) la playa tiende a ser más ancha y los cantiles se desvanecen. Los muros costeros son aislados y protegen directamente las propiedades interactuando ocasionalmente con el oleaje. A diferencia del segmento norte, en este segmento el material sedimentario es exclusivamente arenoso. En el extremo sur de este segmento desembocan dos arroyos (Guagatay y Rosarito) cuyos flujos son principalmente invernales.

A 14 km al oeste de la costa de Rosarito se encuentran las Islas Coronados (tres islas, la mayor de 3.3 km de longitud y la menor de tan sólo 1 km). Estas islas presentan una orientación N-NW de cara al oleaje de mar abierto, el cual proviene predominantemente del NW y W-SW. El fondo marino entre las islas y el bloque continental es de pendiente relativamente baja. Presenta un arreglo de isobatas que se asemeja a un tómbolo, indicando que las islas transforman significativamente el oleaje en cuanto a altura y dirección, creando una zona protegida al oleaje de mar abierto (Martínez-Díaz-de-León 2002) (fig. 1, recuadro).

Métodos

Para el levantamiento mensual de los perfiles de playa se fijaron nueve monumentos como puntos de control, los cuales se usaron como puntos de partida en los perfiles de playa (fig. 1). Las mediciones iniciaron en junio de 1997 en los puntos de control 1, 3, 5 y 9 y en enero de 1998 en los puntos de control 2, 4, 6, 7 y 8, continuando en todos los casos hasta la actualidad; sin embargo, en este trabajo sólo se analiza la información generada hasta junio de 2006.

Los levantamientos se efectuaron durante la marea diurna más baja del mes para asegurar el cruce del perfil con el datum de referencia NBMI (nivel de bajamar media inferior), utilizando un nivel de burbuja, estatal y cinta métrica, y obteniendo el desnivel cada 5 m o cada que hubiera un cambio significativo en el perfil. El volumen de arena por metro lineal de playa en la parte subaérea se calculó como el área bajo el perfil de playa y por arriba del NBMI hasta el punto de cruce del perfil con el NBMI.

Para el análisis de la respuesta multianual de la playa se utilizó la variación mensual del volumen de arena relativo al volumen de arena inicial del perfil inicial, ya que éste es un atributo más confiable que el ancho de playa (Zimmerman y Bokuniewicz 1987, Hicks *et al.* 1999). La tendencia mínima detectable (TMD), definida como el cambio de volumen mínimo que puede ser atribuible a la tendencia erosional/acrecional de largo plazo, se calculó mediante la razón del promedio de los cambios absolutos de volumen en perfiles sucesivos dividido entre el lapso total de mediciones. Para establecer la tendencia de largo plazo (TLP) de erosión o acreción de la playa se utilizó un modelo de regresión lineal en el que la pendiente de la recta que mejor se ajustó a los datos representa la tasa de cambio anual.

The surveys were conducted during the lowest diurnal tide of the month to assure the intersection with the mean lower low water (MLLW) reference datum. All measurements were made using a bubble level, stadia rod, and tape measure, determining the slope every 5 m or whenever there was a significant change in the profile. Sand volume per linear meter of shoreline in the subaerial part was calculated as the area below the beach profile and above the MLLW until the profile and MLLW intersected.

Analysis of the multiannual shoreline response was performed using the monthly variation of the sand volume relative to the initial sand volume of the initial profile because it is a more reliable attribute than beach width (Zimmerman and Bokuniewicz 1987, Hicks *et al.* 1999). The minimum detectable trend (MDT), defined as the minimum volume change attributable to the long-term erosional or accretional trend, was calculated using the ratio of the mean value of absolute volume changes in successive profiles divided by the total measurement period. To establish the long-term trend (LTT) of beach erosion or accretion, a linear regression model was used in which the slope of the best-fit straight line represented the rate of annual change.

Results

Northern segment

Four control points (1 to 4) were established in the northern segment of the shoreline where a total of 416 beach profiles



Figure 2. Rocky platform exposed after intense beach erosion near control points 2 and 3.

Figura 2. Plataforma rocosa expuesta después de erosión intensa de playa en la cercanía de los puntos de control 2 y 3.

Resultados

Segmento norte

En el segmento norte de playa se instalaron cuatro puntos de control (1 al 4) sobre los que se levantaron un total de 416 perfiles de playa. El comportamiento del volumen de arena presentó cambios marcadamente estacionales en todos los puntos de control (fig. 3).

Table 1. Sand volume change in the northern and southern segments of the Rosarito shoreline: T is the total measurement period, Vm is the mean sand volume in the subaerial beach, ΔV_{mt} is the absolute value of the monthly mean erosional/accretional change, MDT is the minimum detectable trend, and LTT is the long-term erosional/accretional trend of volume change.

Tabla 1. Cambio del volumen de arena en los segmentos de playa estudiados: T es el periodo total de mediciones, Vm es el volumen medio de arena en la playa subaérea, ΔV_{mt} es el valor absoluto del cambio medio erosional/acrecional de mes a mes, MDT es la tendencia mínima detectable de largo plazo, LTT es la tendencia erosiona/acrecional del cambio de volumen de largo plazo.

Control point	T (years)	Vm ($m^3 m^{-1}$)	ΔV_{mt} ($m^3 m^{-1} month^{-1}$)	MDT ($m^3 m^{-1} year^{-1}$)	LTT ($m^3 m^{-1} year^{-1}$)
Northern segment					
1	9.2	86.5	21.0	2.3	-0.3
2	8.5	73.2	15.5	1.8	4.1
3	9.2	73.5	12.7	1.4	2.4
4	8.5	65.1	16.9	2.0	-0.7
$\bar{X}$	—	74.6	16.5	1.9	1.4
Southern segment					
5	9.1	76.0	20.5	2.3	1.4
6	8.5	125.7	20.9	2.5	9.1
7	8.5	184.1	19.1	2.3	13.6
8	8.5	273.8	18.5	2.2	10.7
9	9.1	166.5	20.5	2.3	10.9
$\bar{X}$	—	165.2	19.9	2.3	9.1

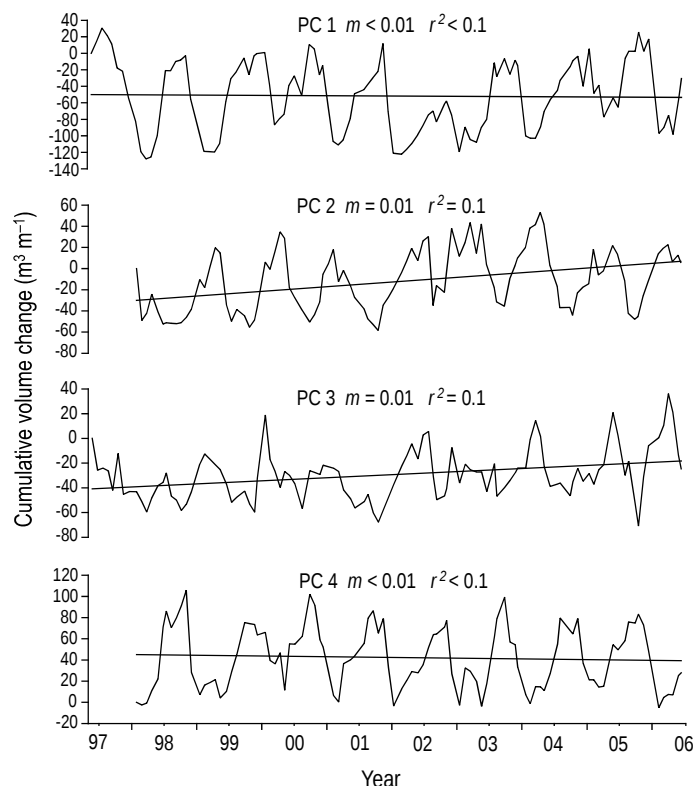


Figure 3. Long-term trend of the cumulative volume change in the northern section of the Rosarito (Baja California) shoreline.

Figura 3. Tendencia de largo plazo en el cambio acumulado de volumen en el segmento norte de playa en Rosarito, Baja California.

were surveyed. The sand volume behaviour showed marked seasonal changes at all the control points (fig. 3).

The values characterizing the sand volume changes in the study area are shown in table 1. Mean sand volume (V_m) for the northern segment varied between 65.1 and 86.5 $\text{m}^3 \text{m}^{-1}$. The mean value of the monthly change in volume of sand gained or lost (ΔV_{mt}) for each control point ranged from 12.7 to 21 $\text{m}^3 \text{m}^{-1} \text{month}^{-1}$. The MDT of shoreline erosion/accretion oscillated between 1.4 and 2.3 $\text{m}^3 \text{m}^{-1} \text{year}^{-1}$, with a mean value of 1.9 $\text{m}^3 \text{m}^{-1} \text{year}^{-1}$.

The LTT was -0.3 and $-0.6 \text{ m}^3 \text{m}^{-1} \text{year}^{-1}$ for control points 1 and 4, respectively, indicating a non-significant erosion condition. In contrast, the LTT for control points 2 and 3 was accretional and slightly detectable, with sand accumulation rates of 4.1 and 2.4 $\text{m}^3 \text{m}^{-1} \text{year}^{-1}$, respectively. The maximum correlation coefficient values ($r^2 = 0.1$) obtained for these two control points indicate that the LTT may be masked by other short-term processes.

Southern segment

In the southern segment of the shoreline, 509 profiles were surveyed at five control points (5 to 9). Except for control point 5, sand volume showed a less marked seasonal pattern than in the northern segment (fig. 4).

En la tabla 1 se indican los valores que caracterizan los cambios del volumen de arena a lo largo de la zona de estudio. El volumen de arena medio (V_m) en toda la playa varió entre 65.1 y 86.5 $\text{m}^3 \text{m}^{-1}$. El promedio del cambio mensual de volumen de arena ganado o perdido (ΔV_{mt}) para cada uno de los puntos de control fue entre 12.7 y 21 $\text{m}^3 \text{m}^{-1} \text{mes}^{-1}$. La TMD de erosión/acreción de la playa varió entre 1.4 y 2.3 $\text{m}^3 \text{m}^{-1} \text{año}^{-1}$, con un promedio de 1.9 $\text{m}^3 \text{m}^{-1} \text{año}^{-1}$.

La TLP fue de -0.3 y $-0.6 \text{ m}^3 \text{m}^{-1} \text{año}^{-1}$ en los puntos de control 1 y 4, respectivamente, que representan una condición erosional poco significativa. Por contraste, en los puntos de control 2 y 3, las TLP fueron acrecionales y ligeramente detectables con tasas de acumulación de arena de 4.1 y 2.4 $\text{m}^3 \text{m}^{-1} \text{año}^{-1}$, respectivamente. Los valores máximos de los coeficientes de correlación ($r^2 = 0.1$) que resultaron para estos dos puntos de control indican que la TLP puede estar enmascarada por otros procesos de corto plazo.

Segmento sur

En el segmento sur de playa se levantaron 509 perfiles en cinco puntos de control (5 al 9). Con excepción del punto de control 5, el volumen de arena mostró un patrón estacional menos marcado que en el segmento norte de playa (fig. 4).

El promedio de arena contenida en la playa subaérea para todo el segmento de playa fue de 165.2 $\text{m}^3 \text{m}^{-1}$. El ΔV_{mt} del volumen de arena ganado o perdido en perfiles sucesivos para cada uno de los puntos de control varió entre 18.5 y 20.9 $\text{m}^3 \text{m}^{-1} \text{mes}^{-1}$, con un promedio de 19.9 $\text{m}^3 \text{m}^{-1} \text{mes}^{-1}$. La TMD de erosión/acreción de la playa varió entre 2.2 y 2.5 $\text{m}^3 \text{m}^{-1} \text{año}^{-1}$, con un promedio de 2.3 $\text{m}^3 \text{m}^{-1} \text{año}^{-1}$.

La TLP fue positiva en todos los puntos de control lo que indica una tendencia acrecional, con tasas de acumulación de arena que variaron entre 8.8 y 13.9 $\text{m}^3 \text{m}^{-1} \text{año}^{-1}$; aunque en el punto de control 5 la tendencia resultó ser de sólo 1.4 $\text{m}^3 \text{m}^{-1} \text{año}^{-1}$ (fig. 4, tabla 1). Los coeficientes de correlación variaron entre 0.31 y 0.61, con excepción del punto de control 5 cuyo valor fue de sólo 0.01. La tasa media de acumulación para todo este segmento de playa fue de 9.1 $\text{m}^3 \text{m}^{-1} \text{año}^{-1}$, pero al considerar solo la parte sur del segmento (puntos de control 6 al 9) la tasa de acumulación se incrementa a 11.1 $\text{m}^3 \text{m}^{-1} \text{año}^{-1}$.

Discusión

De la serie de tiempo de perfiles de playa más larga de la que se tenga conocimiento para playa mexicana alguna, aquí analizada, se documenta que el comportamiento interanual del volumen de arena muestra un patrón marcadamente estacional. En los dos segmentos de línea de costa aquí considerados el mayor volumen de arena contenido en la playa se observa durante verano-otoño y el menor en invierno-primavera. Esta variación del volumen contenido en la playa entre verano e invierno coincide con la variabilidad observada en el clima del oleaje que arriba a las playas de Rosarito en dichas épocas. Marichal-González (2001) analizó registros de oleaje

The mean amount of sand contained in the subaerial beach of all the southern segment was $165.2 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1}$. The ΔV_{mt} of volume of sand gained or lost in successive profiles for each one of the control points varied between 18.5 to $20.9 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ month}^{-1}$, with a mean value of $19.9 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ month}^{-1}$. The MDT of beach erosion/accretion ranged from 2.2 to $2.5 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ year}^{-1}$, with a mean value of $2.3 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ year}^{-1}$.

The LTT was positive for all the control points, indicating an accretional trend. The sand accumulation rates ranged from 8.8 to $13.9 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ year}^{-1}$, though at control point 5 the trend was only $1.4 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ year}^{-1}$ (fig. 4, table 1). The correlation coefficients varied between 0.31 and 0.61 , except the one for control point 5, which was only 0.01 . The mean rate of accumulation for all this part of the shoreline was $9.1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ year}^{-1}$, but if only control points 6 to 9 are considered, the rate increases to $11.1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ year}^{-1}$.

Discussion

Our beach profile time series, apparently the longest for any Mexican beach, showed that the interannual behaviour of sand volume presents a marked seasonal pattern. In both beach segments considered herein the highest volume of sand contained in the shoreline was observed in summer-autumn and the lowest in winter-spring. This variation in beach sand volume between summer and winter coincides with the variability observed in the climate of the waves arriving at the Rosarito coast during those seasons. Marichal-González (2001) analyzed wave records obtained between June 1994 and January 1999 off the breakwaters of the thermoelectric plant and found that the wave climatology was strongly seasonal, with highest energy levels occurring in winter-spring and lowest in summer-autumn. Moreover, the variability in sand volume corresponds to the pattern observed for most beaches around the world (Sheppard 1950, Winant *et al.* 1975, Larson and Kraus 1994, Lacey and Peck 1998, Eliot and Clarke 1982, Anfuso *et al.* 2006).

An interesting finding was that control points 2 and 3 showed an inverted seasonal variation in volume, that is, a lower volume in spring-autumn and higher volume in winter-spring. This inverted cycle in seasonal variation has not been frequently observed along exposed beaches and may be induced by drastic changes in the local morphology such as the presence of rocky outcrops, which modify the orientation of the coastline and, consequently, generate changes in the direction of breaking waves (Lizárraga-Arciniega 2005). Masselink and Pattiaratchi (2001) indicated that changes in shoreline morphology, even on a small scale, can be responsible for the temporal shift in the variations of sand volume with seasonal or larger-scale periodicity.

The small variability in sand volume and low MDT and LTT values found for the northern segment can be explained considering that in general this section contains 45% less sand volume than the southern part. This low content can be attributed to (a) the narrowing of the sand deposit composing

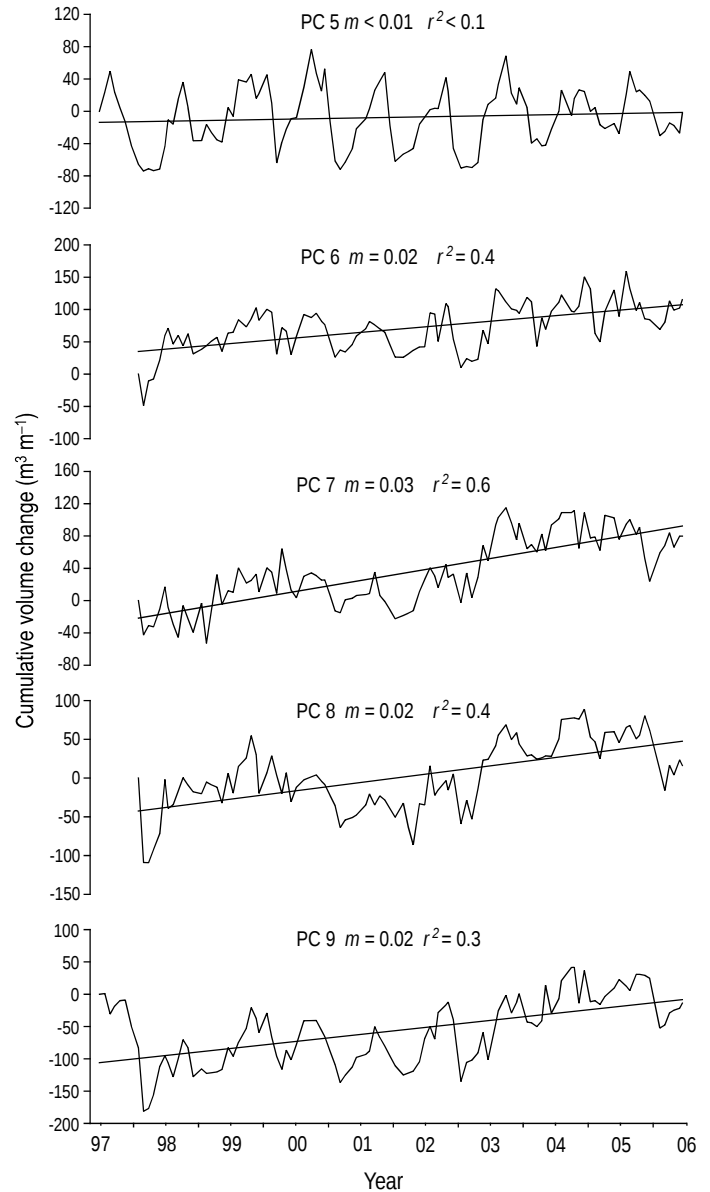


Figure 4. Long-term trend of the cumulative volume change in the southern segment of the Rosarito (Baja California) shoreline.

Figura 4. Tendencia de largo plazo en el cambio acumulado de volumen en el segmento sur de playa en Rosarito, Baja California.

obtenidos entre junio de 1994 y enero de 1999 frente a las estructuras de protección de la toma de agua de la termoeléctrica, encontrando que la climatología del oleaje es fuertemente estacional, con los mayores niveles energéticos en invierno-primavera y los menores en verano-otoño. Más aún, la variabilidad observada en el volumen de arena corresponde igualmente con el patrón observado en la mayoría de las playas alrededor del mundo (Sheppard 1950, Winant *et al.* 1975, Larson y Kraus 1994, Lacey y Peck 1998, Eliot y Clarke 1982, Anfuso *et al.* 2006).

En los puntos de control 2 y 3 se observó un resultado interesante, ya que mostraron una variación estacional de volumen invertida, esto es, menor volumen en verano-otoño y

the littoral bottom and the consequent reduction in available sand in the coastal system, (b) the limited availability of sand in the breaking zone due to the presence of a rocky platform underlying the sand deposit and extending from the foreshore to the submerged part of the beach (fig. 2), and (c) the limited exchange of sand from the bluffs and breaking zone due to the presence of seawalls. Other authors have also observed a similar pattern with the presence of seawalls, since they reduce the magnitude of the monthly volume changes particularly after storm events (Zimmerman and Bokuniewicz 1987, Hazelton *et al.* 1994, Basco *et al.* 1997).

In the northern segment the LTT was not detectable at control points 1 and 4, and was slightly detectable at points 2 and 3 since their sand volume changes were lower than the corresponding MDT (table 1). These conditions indicate a balance between the contribution and losses of coastal sediments, resulting in dynamically stable beaches in the long term, the seasonal changes generated by the onshore transport having a greater influence than the long-term erosional/accretional trends. This behaviour can also be deduced considering that the sand volume change driven by the seasonal cycle ($40 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1}$) (Lizárraga-Arciniega *et al.* 2007) is greater than the total sand volume ($17 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1}$) that would be added to the beach based on the MDT estimated in this study.

In the southern segment, the MDT was $2.3 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ year}^{-1}$ and the mean value of accretional LTT was $11.2 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ year}^{-1}$, excluding control point 5 (table 1). This trend is a response to the approximately $8000 \text{ m}^3 \text{ year}^{-1}$ of sediment discharged into the coastal system by the Guagatay and Rosarito streams (Appendinni-Albretschsen 1998). This material is primarily redistributed northwestward since the waves in this area persistently approach from the southwest (Marichal-González 2001, Lizárraga-Arciniega 2005), producing a current in that direction. In general, the accretional trend suggests that longshore sand transport plays a more important role in the southern segment than in the northern part due to the proximity of the streams that are the main contributors of sand, resulting in wider beaches that are not limited by either seawalls or rocky platforms in the breaking zone.

The accretional/erosional LTT estimated for the Rosarito shoreline may be associated with the variability of the littoral transport. Some authors (Jiménez and Sánchez-Arcilla 1993, Fenster and Dolan 1994, Morton *et al.* 1994, Lacey and Peck 1998) indicate that in the case of sandy shorelines the LTT may be influenced not only by the variations in the rate of littoral transport, but also by the inversion in the direction of the littoral drift. This last point, however, does not seem to be relevant for the Rosarito shoreline, since the waves persistently approach from the southwest throughout the year (Marichal-González 2001).

The presence of the Coronado Islands 14 km to the west of Rosarito and the complex bathymetry between them and the mainland are morphotopographic features that could influence the LTT. Their influence may be associated with changes in wave energy distribution patterns due to processes such as

mayor volumen durante invierno-primavera. Este ciclo invertido en la variación estacional ha sido poco observado en playas expuestas y podría estar siendo inducido por cambios drásticos en la morfología local, como son la presencia de salientes y afloramientos rocosos que modifican la orientación de la línea de costa y, en consecuencia, inducen cambios en la dirección de rompiente del oleaje (Lizárraga-Arciniega 2005). Masselink y Pattiaratchi (2001) señalan que los cambios en la morfología de la costa, aunque sean de pequeña magnitud, pueden ser responsables del desfase temporal en las variaciones del volumen de arena con periodicidad estacional o de mayor escala.

La poca variabilidad en el volumen de arena del segmento norte y sus valores tan bajos de TMP y TLP pudieran explicarse si observamos que, en general, este segmento contiene 45% menos volumen de arena que el segmento sur. Este bajo contenido se puede explicar en función de (a) el estrechamiento del depósito arenoso que conforma el suelo litoral y la consecuente reducción de arena disponible en el sistema litoral; (b) la limitada disponibilidad de arena en la zona de rompiente por la presencia de la plataforma rocosa que subyace al depósito arenoso y que se extiende desde la antepaya hasta la parte sumergida de la playa (fig. 2), y (c) el limitado intercambio de arena proveniente de los cantiles y la zona de rompiente debido a la presencia de muros costeros en la parte posterior. Otros autores también han observado un patrón similar con la presencia de muros, ya que estos reducen la magnitud de los cambios de volumen mensual, en particular después de eventos de tormenta (Zimmerman y Bokuniewicz 1987, Hazelton *et al.* 1994, Basco *et al.* 1997).

En el segmento norte las TLP no resultaron detectables en los puntos de control 1 y 4, y fueron apenas detectados en los puntos 2 y 3 ya que presentaron cambios de volumen de arena menores que las TMD correspondientes (tabla 1). Estas condiciones indican que las contribuciones y pérdidas de sedimentos del sistema litoral están balanceadas y dan lugar a playas dinámicamente estables en el largo plazo, y que los cambios estacionales inducidos por el transporte perpendicular tienen mayor influencia que las tendencias erosionales/acrecionales de largo plazo. Este comportamiento se puede deducir también al observar que el volumen de arena que se mueve debido a la influencia del ciclo estacional ($40 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1}$) (Lizárraga-Arciniega *et al.* 2007) es mayor que el volumen total de arena ($17 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1}$) que se añadiría a la playa conforme la TLP estimada en este estudio.

En las playas del segmento sur la TMD es de $2.3 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y el promedio de la TLP acrecional es de $11.2 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ año}^{-1}$, excluyendo el punto de control 5 (tabla 1). Esta tendencia es una respuesta a la contribución de aproximadamente $8000 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$ de sedimento que ingresan al sistema litoral por los arroyos Guagatay y Rosarito (Appendinni-Albretschsen 1998). La redistribución de este material es principalmente en dirección noroeste ya que el oleaje en esta zona proviene persistentemente del suroeste (Marichal-González 2001, Lizárraga-Arciniega 2005) lo que produce una corriente litoral

wave refraction and diffraction (Martínez-Díaz-de-León 2002), as has been observed in other regions (Hicks *et al.* 1999, Schawb *et al.* 1999, Cipriani and Stone 2001). For Rosarito, however, it is necessary to generate more information for the analysis of long-term wave patterns.

Acknowledgements

This study was supported by the Institute of Oceanological Research, Autonomous University of Baja California (project number 8495), and the Mexican Ministry of Public Education (SEP-2004-C01-47656). The authors thank E Gil-Silva and marine science students for valuable assistance in the field and initial processing of data.

English translation by Christine Harris.

References

- Anfuso G, Bello E, Benavente J, Nachite D, Macias A. 2006. Características morfológicas y variabilidad volumétrica de las playas del litoral entre Ceuta y Cabo Negro (Marruecos). *Cienc. Mar.* 32: 579–588.
- Appendini-Albretschsen CM. 1998. Plan de manejo de la erosión costera para playas de Rosarito, Baja California, México. M.Sc. thesis, Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, 123 pp.
- Basco DR, Bellomo DA, Hazelton JM, Jones BN. 1997. The influence of seawalls on subaerial beach volumes with receding shorelines. *Coast. Eng.* 30: 203–223.
- Bokuniewicz HJ. 1981. The seasonal beach at East Hampton, New York. *Shore & Beach* 49: 28–32.
- Cipriani LE, Stone GW. 2001. Net longshore sediment transport and textural changes in beach sediments along the southwest Alabama and Mississippi barrier islands, USA. *J. Coast. Res.* 17: 443–458.
- Crowell M, Leatherman SP, Buckley MK. 1991. Historical shoreline change: Error analysis and mapping accuracy. *J. Coast. Res.* 7: 839–852.
- Eliot IG, Clarke DJ. 1982. Seasonal and biennial fluctuations in subaerial beach sediment volume on Warilla Beach, New South Wales. *Mar. Geol.* 48: 89–103.
- Eliot I, Clarke D. 1989. Temporal and spatial bias in the estimation of shoreline rate-of-change statistics from beach survey information. *Coast. Manage.* 17: 129–156.
- Fenster M, Dolan R. 1994. Large-scale reversals in shoreline trends along the US mid-Atlantic coast. *Geology* 22: 543–546.
- Fenster MS, Dolan R, Morton RA. 2001. Coastal storms and shoreline change: Signal or noise? *J. Coast. Res.* 17: 714–720.
- Hazelton JM, Basco DR, Bellomo D, Williams G. 1994. Statistical variations in beach parameter change rates for walled and non-walled profiles at Sandbridge, VA. *Proc. 24th Coastal Engineering Conference.*
- Hicks DM, Hume TM, Swales A, Green MO. 1999. Magnitudes, spatial extent, time scales and causes of shoreline change adjacent to an ebb tidal delta, Katikati, New Zealand. *J. Coast. Res.* 15: 220–240.
- Jiménez JA, Sánchez-Arcilla A. 1993. Medium-term coastal response at the Ebro delta, Spain. *Mar. Geol.* 114: 105–118.
- Lacey EM, Peck JA. 1998. Long-term beach profile variations along the south shore of Rhode Island, USA. *J. Coast. Res.* 14: 1255–1264.
- en esa dirección. En general, la tendencia acrecional en este segmento de playa pareciera indicar que el transporte de arena paralelo a la playa es más importante aquí que en el segmento norte debido a la cercanía de los arroyos como principales contribuyentes de arena, lo que da como resultado la formación de playas más anchas y no limitadas por muros costeros ni plataformas rocosas en la zona de rompiente.
- En general, las TLP acrecionales/erosionales estimadas para las playas de Rosarito pudieran estar asociadas a la variabilidad del transporte litoral. No obstante algunos autores (Jiménez y Sánchez-Arcilla 1993, Fenster y Dolan 1994, Morton *et al.* 1994, Lacey y Peck 1998) señalan que en costas arenosas no sólo las variaciones en la tasa de transporte litoral pudieran influir la TLP, sino que también la inversión en la dirección del transporte litoral. Sin embargo, este último caso no parece ser relevante en la zona de Rosarito puesto que el oleaje arriba persistentemente del suroeste a lo largo del todo el año (Marichal-González 2001).
- La presencia de las Islas Coronado 14 km al oeste de Rosarito, y la compleja batimetría entre éstas y el continente, son rasgos morfo-topográficos que pueden incidir en las TLP de la playa. Su influencia puede estar asociada a cambios en los patrones de distribución de la energía del oleaje como resultado de procesos como la refracción y la difracción del mismo (Martínez-Díaz-de-León 2002,) como se ha observado en otras regiones (Hicks *et al.* 1999, Schawb *et al.* 1999, Cipriani y Stone 2001). Para Rosarito, sin embargo, es necesario generar mayor información para analizar patrones del oleaje de largo plazo.
- ## Agradecimientos
- Este estudio fue realizado con los apoyos financieros del Instituto de Investigaciones Oceanológicas de la Universidad Autónoma de Baja California (proyecto 8495) y la Secretaría de Educación Pública (convenio SEP-2004-C01-47656). Los autores agradecen a E Gil-Silva y a estudiantes de la Facultad de Ciencias Marinas de la UABC por su invaluable apoyo en el trabajo de campo y en el procesamiento inicial de los registros.
-
- Larson M, Kraus NC. 1994. Temporal and spatial scales of beach profile change, Duck, North Carolina. *Mar. Geol.* 117: 75–94.
- Lizárraga-Arciniega JR. 2005. Cambios espaciotemporales de playa en Playas de Rosarito, Baja California, México. Ph.D. thesis, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, 159 pp.
- Lizárraga-Arciniega R, Martínez-Díaz-de-León A, Delgado-González O, Torres-Navarrete R, Galindo-Bect L. 2007. Alternancia de los ciclos de erosión/acreción de playa relacionados con el oleaje en Rosarito, Baja California, México. *Cienc. Mar.* 33: 259–269.
- Marichal-González AM. 2001. Análisis estadístico del oleaje medido frente a las costas de Rosarito, BC, de 1994 a 1998. B.Sc. dissertation, Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, 60 pp.
- Martínez-Díaz-de-León A. 2002. The usefulness of CDIP wave data further south of the US-Mexican border. *Shore & Beach* 70: 2–4.

- Masselink G, Pattiaratchi CB. 2001. Seasonal changes in beach morphology along the sheltered coastline of Perth, western Australia. *Mar. Geol.* 172: 243–263.
- Morton RA, Paine JG, Gibeaut JC. 1994. Stages and durations of post-storm beach recovery, southeastern Texas coast, USA. *J. Coast. Res.* 10: 884–908.
- Schwab WC, Thieler ER, Allen JS, Foster DS, Swift BA, Denny JF, Danforth WW. 1999. Geologic mapping of the nearshore area offshore Fire Island, New York. *Proc. 4th International Symposium on Coastal Engineering and Science of Coastal Sediment Processes 2*: 1552–1567.
- Sheppard FP. 1950. Beach cycles in Southern California. *Tech. Memo.* 20, USACE, 26 pp.
- Winant CD, Inman DL, Nordstrom CE. 1975. Description of seasonal beach changes using empirical eigenfunctions. *J. Geophys. Res.* 80: 1979–1986.
- Zimmerman MS, Bokuniewicz HJ. 1987. Multi-year beach response along the south shore of Long Island, New York. *Shore & Beach* 55: 3–8.

*Recibido en febrero de 2008;
aceptado en octubre de 2008.*