

*Nota de Investigación/Research Note*Caracterización textural de la arena de playa del Golfo de California, México:
Implicaciones para los procesos costeros y el relieveTextural characterization of beach sands from the Gulf of California, Mexico:
Implications for coastal processes and relief

JJ Kasper-Zubillaga*, A Carranza-Edwards, E Morales De la Garza

Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México. Geología Marina y Ambiental,
Circuito Exterior s/n, Mexico 04510 DF, Mexico. * E-mail: kasper@icmyl.unam.mx**Resumen**

Se realizaron determinaciones del tamaño de grano para 54 muestras de arena de playa de las costas oeste ($n = 25$) y este ($n = 29$) del Golfo de California, México. El objetivo fue establecer las relaciones entre procesos costeros, relieve y parámetros del tamaño de grano para ambas costas con base en las distribuciones del tamaño de grano. Esto se realizó debido a que ambas costas están controladas por procesos marinos y la geomorfología costera ya que los ríos son incipientes en la distribución de la arena. En general, la arena de la costa oeste es gruesa, moderadamente clasificada, con distribuciones simétricas y leptocúrticas a muy leptocúrticas. Las correlaciones entre los parámetros del tamaño de grano en la costa oeste están controladas por menos selección en los procesos costeros para concentrar fracciones en un tamaño de grano, una planicie costera estrecha y diferencias composicionales debido a la litología heterogénea y la presencia de conchas. La arena de la costa este es media, moderadamente bien clasificada, con distribuciones casi simétricas y mesocúrticas a leptocúrticas. Las correlaciones entre los parámetros del tamaño de grano en la costa este están controladas por corrientes litorales en dirección noroeste y una planicie costera más amplia comparada con la costa oeste.

Palabras clave: tamaño de grano, clasificación, asimetría, curtosis, arena de playa, Golfo de California, México.

Abstract

Grain size determinations were carried out for 54 beach-sand samples from the western ($n = 25$) and eastern ($n = 29$) coasts of the Gulf of California, Mexico, in order to establish the relationship among coastal processes, relief, and grain size parameters for both areas based on grain size distributions. This was done because both coastal areas are controlled by marine processes and the geomorphology of the coast, since fluvial discharges are negligible in the distribution of sands. In general, sands from the western coast are mainly coarse, moderately sorted, near-symmetrical with leptokurtic and very leptokurtic distributions. Correlations between grain-size parameters for the western coast are controlled by less selectivity in the coastal processes to concentrate fractions in a specific range of sizes, a narrow coastal plain, and compositional differences in the sands due to the heterogeneous lithology and the presence of carbonate shells. Eastern coast beach sands are medium, moderately well sorted, near-symmetrical with mesokurtic to leptokurtic distributions. Correlations between grain size parameters for the eastern coast are controlled by longshore current drifts in a northwestern direction and a wider coastal plain compared to the western coast.

Key words: grain size, sorting, skewness, kurtosis, beach sands, Gulf of California, Mexico.

Introducción

Las determinaciones del tamaño de grano en sedimentos de río y playa han sido ampliamente utilizadas para establecer las relaciones entre el relieve y los procesos costeros (Friedman 1961, Komar 1976, Emery 1978, Folk 1980, Potter 1986, Ibbeken y Schleyer 1991, Carranza-Edwards *et al.* 1998, Kasper-Zubillaga y Carranza-Edwards 2003, Delgado-González *et al.* 2005). La fricción y el transporte fluvial selectivo son mecanismos que producen tamaños de grano finos (Ibbeken y Schleyer 1991). Además, los cambios en la distribución del tamaño de grano de arenas en zonas costeras se determinan a través de la geomorfología costera, olas,

Introduction

Grain size determinations of river and beach sediments have been widely used to establish relationships between relief and coastal processes (Friedman 1961, Komar 1976, Emery 1978, Folk 1980, Potter 1986, Ibbeken and Schleyer 1991, Carranza-Edwards *et al.* 1998, Kasper-Zubillaga and Carranza-Edwards 2003, Delgado-González *et al.* 2005). Attrition and selective fluvial transport produce fine grain sizes (Ibbeken and Schleyer 1991). Additionally, changes in grain size distributions of sands in coastal areas are determined by coastal geomorphology, waves, longshore transport, winds, tidal regimes, river discharges near the beach, and sand

transporte litoral, vientos, regímenes mareales, descargas fluviales cerca de la playa y la composición de la arena, entre otros factores (Shepard y LaFond 1940, Sevon 1964, Komar e Inman 1970, Carranza-Edwards 2001, Kasper-Zubillaga y Dickinson 2001, Abuodha 2003, Kasper-Zubillaga y Carranza-Edwards 2003). Por ejemplo, las arenas de grano fino y las mejor clasificadas pueden heredarse de procesos selectivos tales como el transporte por largas distancias y los patrones de vientos asociados con una amplia planicie costera. Por tanto, existen varios mecanismos físicos y químicos que producen distribuciones del tamaño de grano distintivas que pueden ser reconocidas y usadas para interpretar los factores que caracterizan un depósito de arena.

El objetivo de este trabajo fue establecer la relación entre el tamaño de grano y la geomorfología y los procesos costeros, en ambas costas del Golfo de California. Esta región resulta particularmente interesante ya que la planicie costera de la costa oeste es estrecha, mientras que la de la costa este es ancha. Procesos marinos como las corrientes litorales y los regímenes de marea en la costa norte, y el oleaje en la costa sudeste del Golfo de California, junto con la planicie costera establecen grupos de playas relacionados con la distribución del tamaño de grano de los sitios costeros. Por otro lado, las descargas fluviales en ambas costas parecen jugar un papel menor en la distribución del tamaño de grano de las arenas debido a su carácter intermitente (costa oeste) y a la intervención humana mediante la construcción de presas (costa este).

Área de estudio

El área de estudio comprende las costas oeste y este del Golfo de California, México. La longitud de la costa oeste es de aproximadamente 1300 km, mientras que la de la costa este es de 1500 km hasta la boca del golfo (fig. 1).

En el Alto Golfo de California, las mareas son semidiurnas con una amplitud media de 10 m, generando corrientes con velocidades de 1.5 a $>3 \text{ m s}^{-1}$ (Thompson 1968). Las corrientes litorales en verano e invierno fluyen en sentido contrario a las manecillas del reloj, con una dirección neta hacia el sureste en la costa oeste y hacia el noroeste en la costa este. Las direcciones de las corrientes litorales en invierno son similares a las observadas en verano y, durante ambas estaciones, las velocidades medias varían de 8 a 10 cm s^{-1} (Fernández-Eguiarte *et al.* 1990a, b).

Las olas en la parte norte del golfo son de poca altura ($\sim 0.30 \text{ m}$), en la parte central miden de 0.60 a 0.90 m y en la parte sur de 1.50 a 1.80 m (Buoy Weather 2005). Los vientos dominantes en la costa oeste soplan hacia la costa del norte y noreste con velocidades de 2 a 6 m s^{-1} , mientras que en la costa este soplan hacia la costa del suroeste y noroeste con velocidades de 2 a 4 m s^{-1} (Pérez-Villegas 1990).

El clima es seco a lo largo de ambas costas en las partes norte y central del Golfo de California, así como en la costa este en la boca. Más al sur prevalece un clima tropical, con lluvias estivales y una temperatura anual media de 20°C y 24°C

composition, among other factors (Shepard and LaFond 1940, Sevon 1964, Komar and Inman 1970, Carranza-Edwards 2001, Kasper-Zubillaga and Dickinson 2001, Abuodha 2003, Kasper-Zubillaga and Carranza-Edwards 2003). For instance, fine-grained and better sorted sands may be inherited from selective processes, such as long transport, wind patterns associated with a wide coastal plain. Hence, several physical and chemical mechanisms produce distinctive grain size distributions that can be recognized and used for interpretation of the factors that characterize a sand deposit.

The aim of this paper is to establish the relationship among grain size and coastal processes and geomorphology, in both coastal areas of the Gulf of California. This region is particularly interesting because the western coast shows a narrow coastal plain, whereas the eastern coast shows a wide coastal plain. Marine processes, like longshore currents and tidal regimes along the northern coast and waves along the southeastern coast of the Gulf of California, together with the coastal plain establish beach groups in relation to the grain size distributions of the coastal sites. Furthermore, along both coasts, river discharges seem to play a small role in the grain size distributions of the sands because of their intermittent character (western coast) and human intervention resulting from dam constructions (eastern coast).

Study area

The study area comprises the western and eastern coasts of the Gulf of California, Mexico. The western coast is approximately 1300 km long, while the eastern coast is up to 1500 km long to the mouth of the gulf (fig. 1).

In the Upper Gulf of California, tides are semidiurnal and have an average amplitude of 10 m, inducing currents with velocities of 1.5 to $>3 \text{ m s}^{-1}$ (Thompson 1968). Longshore currents in summer and winter are counter-clockwise, with a net southeasterly direction on the western coast and a northwesterly direction on the eastern coast. Longshore drift directions in winter are similar to those observed in summer. During both seasons, the average longshore drift velocities range from 8 to 10 cm s^{-1} (Fernández-Eguiarte *et al.* 1990a, b).

Waves in the upper gulf have low heights ($\sim 0.30 \text{ m}$). Waves in the middle gulf are 0.60 to 0.90 m and increase in range in the southern gulf from 1.50 to 1.80 m (Buoy Weather 2005). Prevailing northerly and northeasterly onshore winds dominate the western coast with velocities of 2 to 6 m s^{-1} , whereas southwesterly and northwesterly onshore winds control the eastern coast with velocities of 2 to 4 m s^{-1} (Pérez-Villegas 1990).

The climate along the upper and middle western and eastern coasts of the Gulf of California is dry. Along the eastern coast of the gulf mouth it is dry and further south it is tropical, with summer rains showing average annual temperatures of 20°C and 24°C for the western and eastern coasts, respectively (Köppen 1948, Tamayo 2002). Average annual precipitation is 200 mm on the western and eastern coasts of the gulf,

para las costas oeste y este, respectivamente (Köeppen 1948, Tamayo 2002). La precipitación anual media es de 200 mm en ambas costas del golfo, pero incrementa hacia el sur en la costa este, alcanzando valores de 400 a 1200 mm (Tamayo 2002).

Las principales unidades geomorfológicas de la costa del Golfo de California son la costa occidental de California y la planicie costera oriental (Tamayo 2002). La costa oeste muestra un alto relieve con elevaciones de 200 m a más de 2000 m, mientras que la costa este muestra un relieve plano con elevaciones de 0 a 200 m (Tamayo 2002). Las costas oeste y este son angosta y amplia, respectivamente. Además, las pendientes son estrechas y empinadas en la costa oeste y relativamente planas en la costa este. La plataforma continental es, en promedio, somera y estrecha (200 m) enfrente de la costa oeste y somera pero más amplia enfrente de las partes norte y sur de la costa este.

Los ríos son insignificantes a lo largo de la costa oeste, mientras que los sistemas fluviales en la costa este son de tipo anastomótico incipiente. En general, las descargas hacia el mar de la red fluvial están controladas por la ocurrencia ocasional de tormentas o lluvias fuertes y por intervención humana principalmente debido a la construcción de presas y el uso de los ríos para propósitos de irrigación, lo que puede reducir el transporte de sedimentos hacia la costa.

Material y métodos

Se recolectaron 54 muestras de arena de las costas oeste ($n = 25$) y este ($n = 29$) del Golfo de California, de la porción de playa entre los límites de la pleamar y la bajamar, tomando el centímetro superior para evitar el efecto de heterogeneidad en las arenas que puede incrementar los valores de clasificación (Pettijohn *et al.* 1972). Las muestras fueron colocadas en una bolsa de plástico, etiquetadas y sometidas a análisis de tamaño de grano. Se lavaron con agua destilada para eliminar las partículas de sal y se tamizaron a intervalos de 0.25ϕ utilizando un RopTap (estándares de EUA) para obtener los parámetros texturales (tamaño de grano, clasificación, asimetría y curtosis) y los percentiles resultantes de las fórmulas de Folk (1980).

Los resultados del tamaño de grano fueron presentados como perfiles litorales para ambas costas a fin de observar las variaciones en los perfiles de los parámetros texturales (fig. 2). La pendiente de la playa fue medida con una mira taquimétrica de la zona de "swash" (zona en la que, después de romperse la ola, la lámina de agua llega a la línea de costa y asciende por la pendiente de playa [*run-up*] y posteriormente desciende por efecto de la gravedad [*run-down*]) hacia la berma. El número de perfiles fue el mismo que el número de sitios de muestreo y, según el ancho de la porción de playa entre los límites de la pleamar y bajamar y la berma, se construyeron los perfiles. Esto se realizó para hacer una correlación entre la distribución del tamaño de grano y la geomorfología de la playa. Los datos en bruto se encuentran en el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología (UNAM) y algunos perfiles se

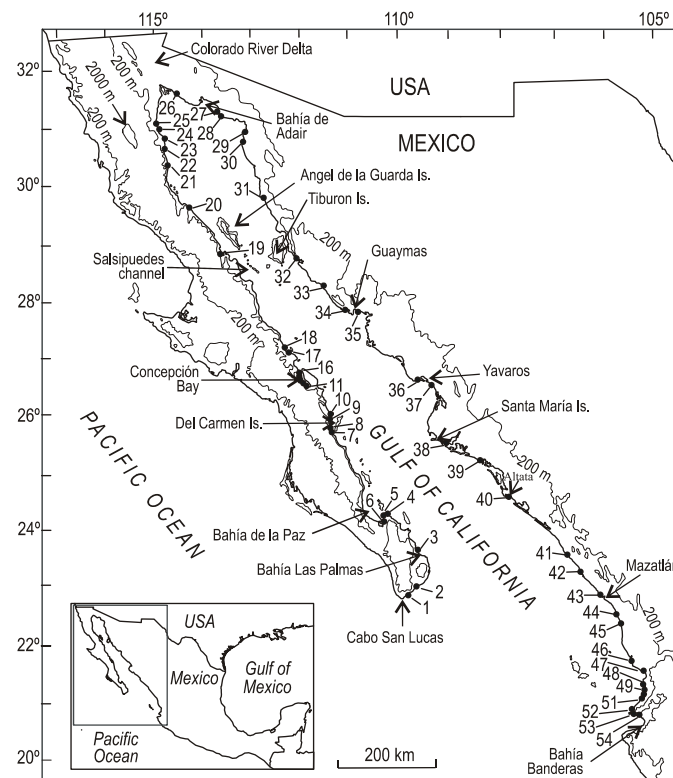


Figura 1. Sitios de muestreo y geomorfología.
Figure 1. Sampling sites and geomorphology.

increasing southwards along the eastern coast with average values of 400 to 1200 mm (Tamayo 2002).

The main geomorphological units of the Gulf of California coastline are the western Californian coast (WCC) and the eastern coastal plain (ECP) (Tamayo 2002). A high relief with altitudes of 200 m to more than 2000 m is observed for the western coast, whereas the eastern coast shows a smooth relief with altitudes ranging from 0 to 200 m (Tamayo 2002). Coastal width is narrow and wide for the western and eastern coasts, respectively. In addition, coastal slopes are narrow and steep for the western coast and relatively smooth for the eastern coast. The continental shelf is on average shallow and narrow (200 m) off the western coast and shallow and wider off the northern and southern parts of the eastern coast.

Rivers are practically negligible along the western coast, whereas fluvial systems on the eastern coast are of incipient anastomotic types. In general, seaward discharges of the fluvial network are controlled by the occasional occurrence of heavy storms or rains and by human intervention, mainly as a result of dam constructions and the use of fluvial systems for irrigation purposes that may reduce the sediment input towards the coast.

Material and methods

Fifty-four sand samples were collected from the western ($n = 25$) and eastern ($n = 29$) coasts of the Gulf of California,

muestran en el trabajo de Carranza-Edwards *et al.* (1998). Se establecieron por separado las correlaciones entre los parámetros texturales y la pendiente de la cara de la playa para la arena de las costas oeste y este usando la paquetería Statistica. También se realizaron correlaciones entre los parámetros texturales mediante diagramas bivariantes (Friedman 1961, Khalaf 1989). Se llevó a cabo un análisis de agrupamiento para los sitios de arena de playa de ambas costas del Golfo de California.

Resultados

Arena de playa de la costa oeste

Para la arena de playa de la costa oeste, el tamaño medio de grano fue 0.88 ϕ , la clasificación fue 0.83 ϕ , la asimetría fue -0.06 y la curtosis fue 0.15, lo que corresponde a una arena

from the foreshore area of the beach, taking the uppermost centimeter to avoid the heterogeneity effect in the sands that may increase the sorting values (Pettijohn *et al.* 1972). The samples were placed in a plastic bag, labeled and sent for grain size determination. They were washed with distilled water to remove salt particles and sieved at 0.25- ϕ intervals using a RopTap (US standards) in order to obtain the textural parameters (grain size, sorting, skewness and kurtosis) and percentiles resulting from Folk's (1980) formulae.

Grain size results were presented as alongshore profiles for the western and eastern coasts to observe variations in the textural parameter profiles (fig. 2). Beach slope was surveyed using a stadia, rod and tape from the swash and backwash area of the beach towards the beach berm. The number of profiles was the same as the number of beach sampling sites and, depending on the width of the foreshore and berm, the profiles were constructed. This was done to correlate between grain

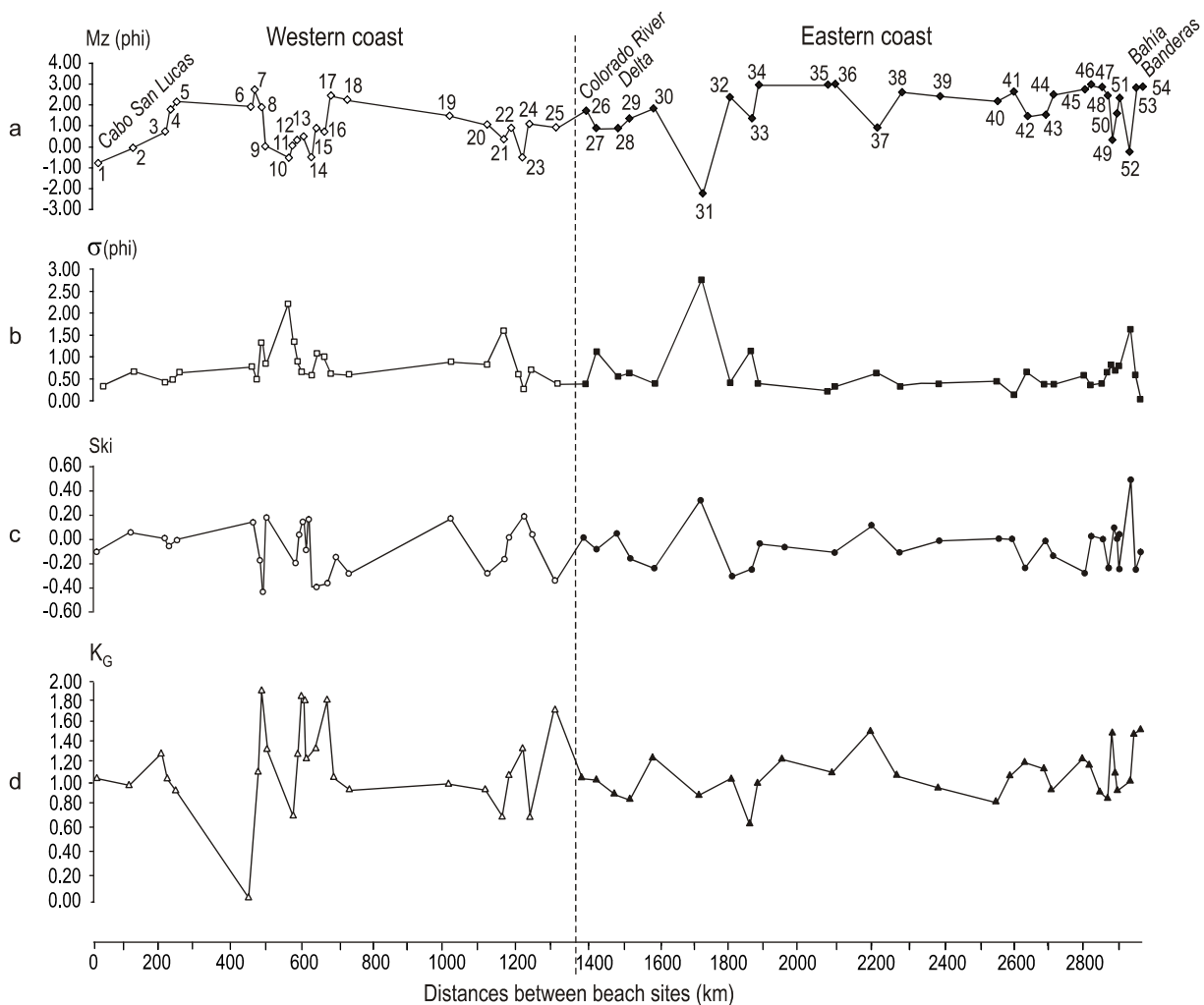


Figura 2. Perfiles de los parámetros del tamaño de grano en las costas oeste y este del Golfo de California: (a) tamaño de grano, (b) clasificación, (c) asimetría y (d) curtosis.

Figure 2. Profiles of grain size parameters along the western and eastern coasts of the Gulf of California: (a) grain size, (b) sorting, (c) skewness and (d) kurtosis.

principalmente gruesa, moderadamente clasificada, con distribuciones casi simétricas y leptocúrticas a muy leptocúrticas (Folk 1980). La pendiente en promedio es de 7°.

El perfil litoral desde Cabo San Lucas hasta el delta del Río Colorado indica que las muestras 6 a 17 describen un cambio abrupto en todos los parámetros del tamaño de grano del perfil (figs. 1, 2a–b). Las muestras 6 a 17 son ligeramente más gruesas que las demás, son de moderadamente a pobremente clasificadas y con asimetría hacia los granos gruesos. También son más leptocúrticas en su distribución, lo que sugiere que concentran los granos gruesos en la parte central de la curva bien pronunciada, dejando los granos más finos en los extremos (Folk 1980).

En la arena de la costa oeste se observaron correlaciones pobres entre la pendiente de la cara de la playa y el tamaño de grano, la clasificación, la asimetría y la curtosis (fig. 3a, b). A pesar de presentar un valor de correlación bajo, la única relación significativa parece existir entre la pendiente de playa y la clasificación.

El análisis de agrupamiento de la arena de la costa oeste mostró que las muestras 4 a 6, que corresponden a la Bahía de La Paz (fig. 1), se agruparon en una sección del lado izquierdo del dendrograma, con cierto traslapeo con otros sitios. Las muestras 8 a 9 y 11 a 16 se agruparon en el lado derecho del dendrograma con cierto traslapeo con los demás sitios (fig. 4a). Éstas corresponden a las muestras de arena que en el perfil litoral se encuentran al norte de Bahía de La Paz, cerca de Bahía Concepción, mostrando un patrón diferente al que presentan los demás sitios (figs. 1, 2).

La arena de playa de la Bahía de La Paz es de mediana a fina, moderadamente clasificada, con asimetría hacia los granos finos y distribuciones mesocúrticas.

Arena de playa de la costa este

Para la arena de playa de la costa este, el tamaño de grano en promedio fue 1.8 ϕ , la clasificación fue 0.65 ϕ , la asimetría fue -0.07 y la curtosis fue 1.08, que corresponde a una arena principalmente mediana, moderadamente bien clasificada, con distribuciones casi simétricas y mesocúrticas a leptocúrticas (Folk 1980). La pendiente media de playa es 4°.

En el perfil litoral, la muestra 31 indica un patrón diferente al resto de los sitios (figs. 1, 2a–b). La arena en este lugar es gruesa, pobremente clasificada, con asimetría hacia los granos finos y distribuciones mesocúrticas.

Para la arena de la costa este sólo se encontraron correlaciones significativas entre la pendiente de la cara de la playa, el tamaño medio de grano y la clasificación (fig. 3a); sin embargo, se puede observar que hay tres correlaciones significativas entre los parámetros del tamaño de grano (fig. 5a, b).

size distributions and geomorphology of the beach. Beach slope raw data are housed at the Institute of Marine Sciences and Limnology (UNAM) and some profiles are shown in the work by Carranza-Edwards *et al.* (1998). Correlations between textural parameters and beach face slope were established for the western and eastern coast beach sands separately using the Statistica software. Correlations between textural parameters were also carried out based on bivariate diagrams (Friedman 1961, Khalaf 1989). A cluster analysis was performed to group beach sand sites from the western and eastern coasts of the Gulf of California.

Results

Western coast beach sands

The average grain size for the western coast beach sands was 0.88 ϕ , sorting was 0.83 ϕ , skewness was -0.06 , and kurtosis was 0.15. The corresponding description is as follows: beach sands are mainly coarse, moderately sorted, and near-symmetrical with leptokurtic and very leptokurtic distributions (Folk 1980). The average beach slope is 7°.

The alongshore profile from Cabo San Lucas to the Colorado River Delta shows that samples 6 to 17 depict an abrupt change in all the grain size parameters of the profile (figs. 1, 2a–b). Samples 6 to 17 are slightly coarser than the rest of the beach sites, moderately to poorly sorted, and coarsely skewed. They are also more leptokurtic in their distribution, suggesting that these beach sands concentrate coarse grains in the central part of the “well-peaked” curve, leaving the tails with finer grains (Folk 1980).

Poor correlations among beach face slope and grain size, sorting, skewness, and kurtosis were observed for the western coast beach sands (fig. 3a, b). Despite the fact that the correlation value was low, the only meaningful relationship seems to be between beach face slope and sorting.

The cluster analysis of the western coast beach sands showed that samples 4 to 6, corresponding to La Paz Bay (fig. 1), grouped in one sector of the left side of the dendrogram with some overlap with other sites. Samples 8 to 9 and 11 to 16 are grouped on the right side of the dendrogram with some overlap with the rest of the sites (fig. 4a). They correspond to the sand samples shown in the alongshore profile north of La Paz Bay, close to Concepción Bay, which have a dissimilar pattern to that shown by the rest of the beach sites (figs. 1, 2).

Beach sands in La Paz Bay are medium to fine, moderately sorted, and fine-skewed with mesokurtic distributions.

Eastern coast beach sands

The average grain size for the eastern coast beach sands was 1.8 ϕ , sorting was 0.65 ϕ , skewness was -0.07 , and kurtosis was 1.08. The corresponding description is as follows: beach sands are mainly medium, moderately well sorted, near-

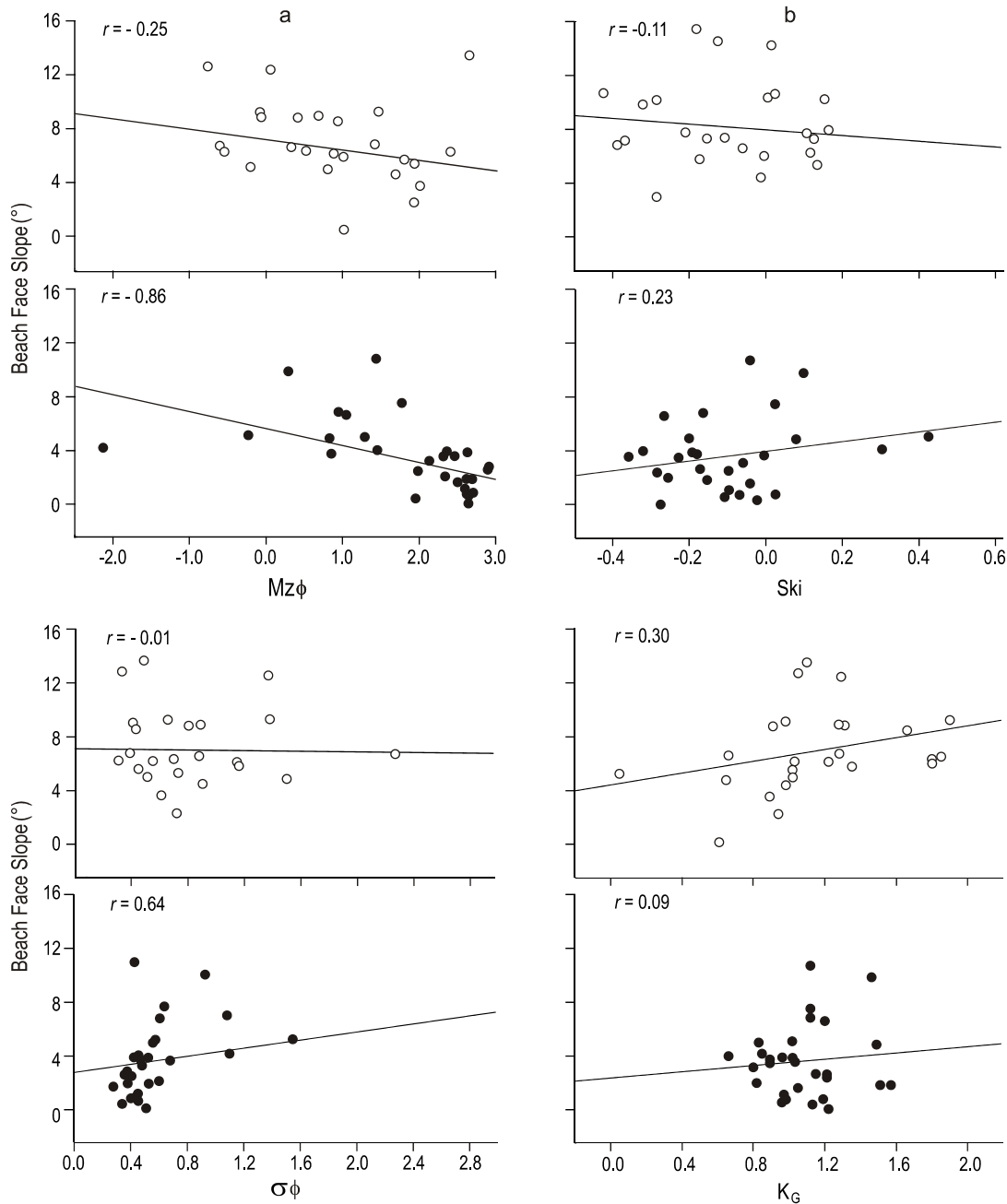


Figura 3a, b. Correlaciones entre la pendiente de playa y los parámetros del tamaño de grano para las costas oeste (○) y este (●) del Golfo de California. Mz = tamaño de grano, σ = clasificación, Ski = asimetría y K_G = curtosis.
Figure 3a, b. Correlations between beach slope and grain size parameters for the western (○) and eastern (●) coasts of the Gulf of California. Mz = grain size, σ = sorting, Ski = skewness, and K_G = kurtosis.

El análisis de agrupamiento de la arena de la costa este mostró que las muestras 31 y 33 a 42 se agruparon en el lado izquierdo del dendrograma, con cierto traslapeo con otros sitios (fig. 4b). Éstas, sin embargo, corresponden a la planicie costera relativamente más amplia de la costa este en comparación con los demás sitios de la misma área (fig. 1). Las muestras en el lado izquierdo del dendrograma no muestran un grupo bien definido (fig. 4b). Las muestras 48, 50 y 51 corresponden a la zona norte de Bahía Banderas.

symmetrical with mesokurtic to leptokurtic distributions (Folk 1980). The average beach slope is 4°.

In the alongshore profile, sample 31 showed a dissimilar pattern to the rest of the beach sites (figs. 1, 2a–b). Sands at this site are coarse, poorly sorted, and fine-skewed with mesokurtic distributions.

For the eastern coast beach sands, the only significant correlations observed are among beach face slope, mean grain size, and sorting (fig. 3a); however, it can be observed that

Discusión

Arena de playa de la costa oeste

De acuerdo con Shepard (1973), las pendientes de playa de 7° concentran arenas gruesas debido a la inclinación producida por el efecto “swash”, y las corrientes litorales en la cara de la playa como consecuencia de, entre otros factores, la erosión de riscos y rocas en una planicie costera estrecha y la poca selectividad de las corrientes litorales para proveer tamaños más finos.

Los perfiles litorales sugieren que el efecto de una larga residencia de las fracciones gruesas en las arenas con poco aporte de tamaños más finos probablemente sea resultado de la baja velocidad de las corrientes litorales en esta área en comparación con otras zonas costeras de la parte oeste del Golfo de California, especialmente de donde provienen las muestras 6 a 17. Además, los sitios en esta área están menos expuestos a la energía del oleaje y las olas altas debido a la presencia de bahías pequeñas e islas cerca de la costa (fig. 1). La contribución de nuevo sedimento hacia el mar podría ocurrir sólo durante episodios de lluvias fuertes o tormentas.

La relación significativa entre la pendiente de la cara de la playa y la clasificación puede ser resultado de la concentración de arenas de bien a moderadamente clasificadas en la costa oeste, de 0.4 a 1.0 ϕ en pendientes de 4° a 14°, lo que implica que las playas de pendiente alta están compuestas de arenas gruesas y mejor clasificadas. Esto ya se había encontrado en otros estudios de arena de playa (Krumbein y Graybill 1965, McLean y Kirk 1969). Esta observación también es sustentada por lo informado para otras regiones costeras estrechas, como California, Nueva Zelanda y el suroeste de México, donde se encuentran arenas de medias a gruesas y moderadamente clasificadas (Bascom 1951, Carranza-Edwards 2001, Kasper-Zubillaga y Dickinson 2001).

Se puede observar la falta de una correlación significativa entre los parámetros del tamaño de grano (fig. 5a–c). El tamaño de grano y la clasificación sólo reflejan la dispersión de las fracciones de grano en la arena de la costa oeste probablemente debido a: (a) una menor selectividad en los procesos costeros para concentrar fracciones en un intervalo de tamaños específico; (b) una planicie costera estrecha; y (c) diferencias composicionales en la arena a causa de la litología heterogénea en la Península de Baja California, representada por la presencia de conchas de carbonato con abundancias de 31% en la arena de la costa oeste (Carranza-Edwards *et al.* 1998). Esto mismo corresponde a los valores de asimetría y curtosis de la dispersión que muestran patrones litorales irregulares en sus perfiles (fig. 2b).

La correlación entre los parámetros del tamaño de grano y la pendiente de la cara de la playa en la planicie costera estrecha del lado occidental del golfo sugiere que las playas de pendiente alta se componen de arenas gruesas y mejor clasificadas. Además, las correlaciones entre los parámetros del tamaño de grano en esta planicie costera estrecha están

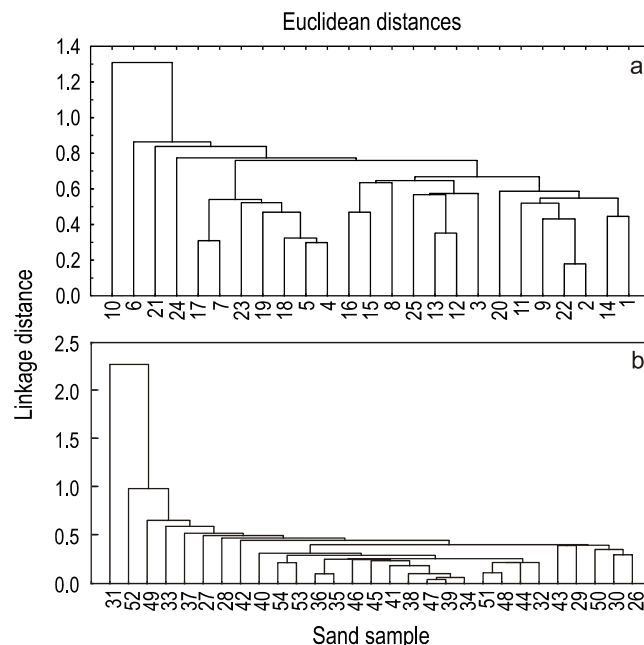


Figura 4. Análisis de agrupamiento para (a) la arena de playa de la costa oeste y (b) la arena de playa de la costa este, del Golfo de California.

Figure 4. Cluster analysis for (a) western coast beach sands and (b) eastern coast beach sands, of the Gulf of California.

there are three significant correlations among grain size parameters (fig. 5a, b).

The cluster analysis of the eastern coast beach sands showed that samples 31 and 33 to 42 are grouped to the left of the dendrogram with some overlapping with other sites (fig. 4b). However, they correspond to the relatively wider coastal plain of the eastern coast compared to the rest of the coastal plain in the same area (fig. 1). Samples on the left side of the dendrogram do not show a well-defined group (fig. 4b). Samples 48, 50 and 51 correspond to the north area of Banderas Bay.

Discussion

Western coast beach sands

According to Shepard (1973), beach slopes of 7° concentrate coarse sands due to the steepness produced by the swash effect (run-up) and longshore currents at the beach face as a consequence of, among other factors, the eroded cliffs and rocks in a narrow coastal plain and little selectivity of the longshore currents to provide finer sizes.

Alongshore profiles suggest that the effect of long-time residence of coarse grain size fractions in the sands with little input of finer sizes is probably caused by the low velocity longshore currents in this area compared with other coastal zones of the western Gulf of California, especially sites 6 to 17. Moreover, beach sites in this area are less exposed to high wave and surf energy due to the presence of near-shore islands and small

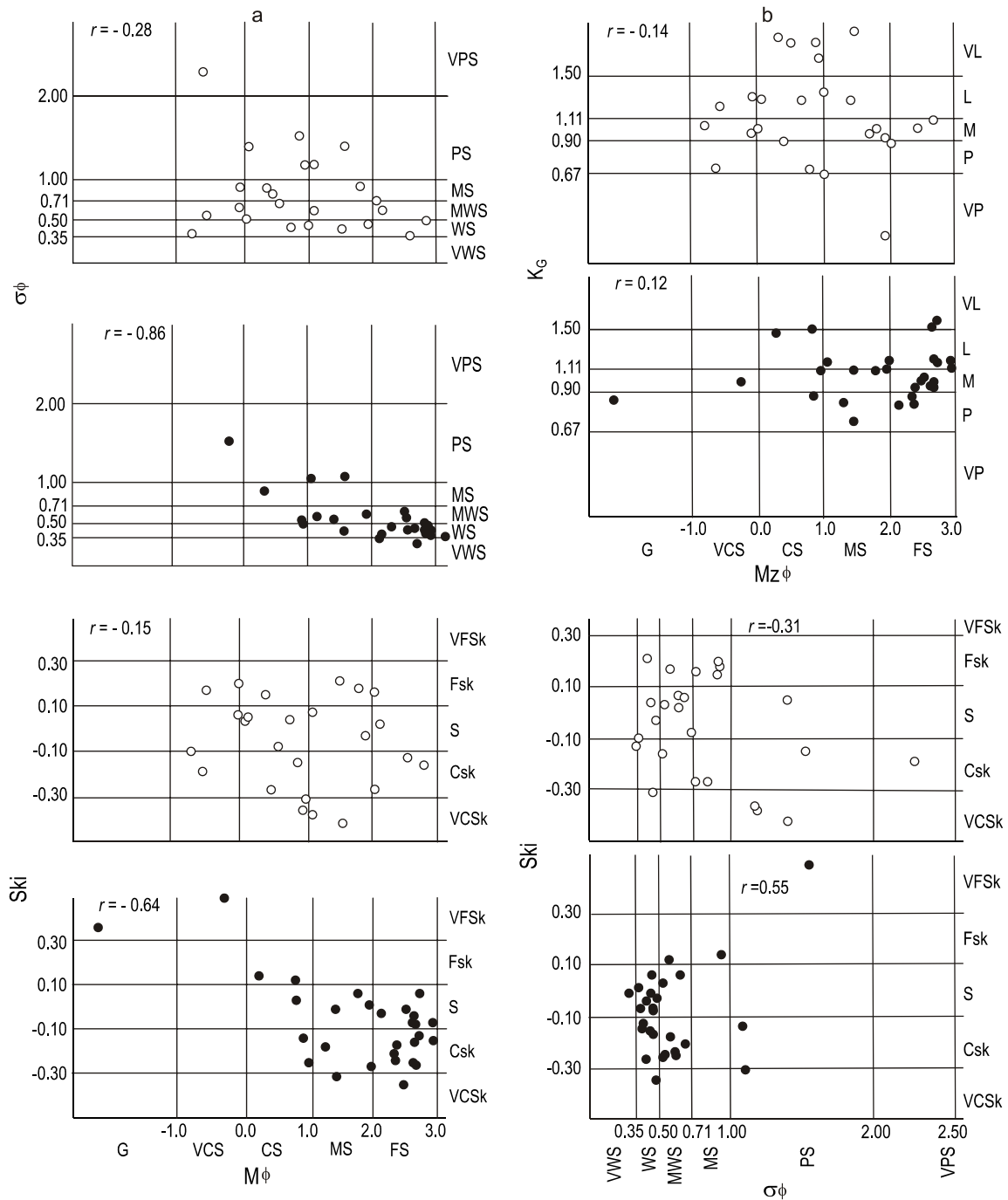


Figura 5a, b, c. Correlaciones entre los parámetros del tamaño de grano para las costas oeste (○) y este (●) del Golfo de California. Mz = tamaño de grano, σ = clasificación, Ski = asimetría y K_G = curtosis. Abreviaturas: G = gránulos, VCS = arena muy gruesa, CS = arena gruesa, MS = arena media, FS = arena fina, VPS = arena muy pobremente clasificada, PS = pobremente clasificada, MS = moderadamente clasificada, MWS = moderadamente bien clasificada, WS = bien clasificada, VWS = muy bien clasificada, VFSk = asimetría hacia los granos muy finos, FSk = asimetría hacia los granos finos, S = simétrica, CSk = asimetría hacia los granos gruesos, VCSk = asimetría hacia los granos muy gruesos, VL = muy leptocúrtica, L = leptocúrtica, M = mesocúrtica, P = platicúrtica, VP = muy platicúrtica.

Figure 5a, b, c. Correlations between grain size parameters for the western (○) and eastern (●) coasts of the Gulf of California. Mz = grain size, σ = sorting, Ski = skewness, and K_G = kurtosis. Abbreviations: G = granules, VCS = very coarse sand, CS = coarse sand, MS = medium sand, FS = fine sand, VPS = very poorly sorted, PS = poorly sorted, MS = moderately sorted, MWS = moderately well sorted, WS = well sorted, VWS = very well sorted, VFSk = very fine skewed, FSk = fine skewed, S = symmetrical, CSk = coarse skewed, VCSk = very coarse skewed, VL = very leptokurtic, L = leptokurtic, M = mesokurtic, P = platikurtic, VP = very platikurtic.

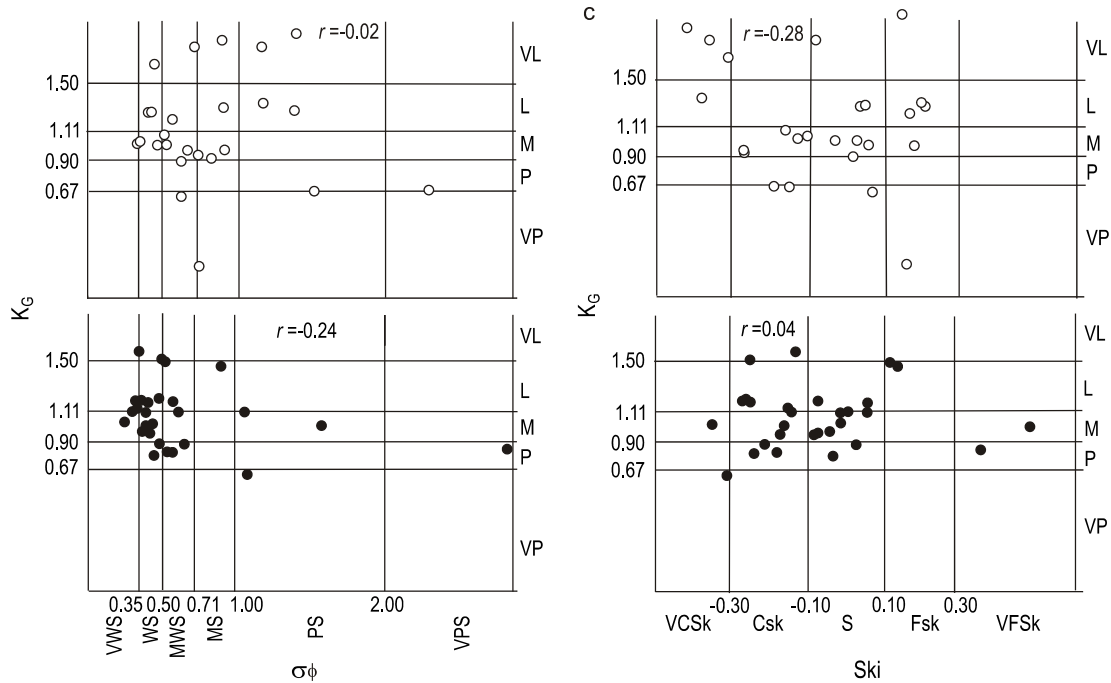


Figura 5 (Cont.)

controladas por un transporte menos selectivo y una composición diferente, especialmente restos biogénicos que afectan la arena. En regiones costeras estrechas con elevaciones mayores de 1000 m, como Calabria (Italia), se ha observado que una disminución en el tamaño de grano corresponde a una reducción en asimetría, lo que indica una alta variabilidad en los parámetros del tamaño de grano debido a un alto relieve, entre 5° y 40°, en el área (Ibbeken y Schleyer 1991). En Calabria la arena también se compone de fracciones de grava que reflejan la inmadurez textural de los sedimentos, comparable con la inmadurez textural de la arena de la costa oeste del Golfo de California, asociada con una costa estrecha y empinada.

Arena de playa de la costa este

El tamaño medio de grano y los valores de clasificación de la arena de la costa este son similares a los encontrados en la costa sur del Golfo de México (Carranza-Edwards 2001), donde hay una planicie costera ancha. Esto sugiere que una planicie costera ancha y las olas, especialmente en la costa del sureste del Golfo de California, pueden generar afinidades de distribución del tamaño de grano entre zonas costeras amplias. Las pendientes de la cara de playa de 4° se caracterizan por arenas de medias a finas (Shepard 1973), probablemente a causa del efecto de acumulación de granos más finos transportados durante el ascenso de la ola (*run-up*) en las planicies costeras amplias.

En el caso particular de la muestra 31, su impredecible comportamiento en el perfil litoral puede atribuirse a la presencia de una planicie costera muy estrecha en la zona que impide

bays (fig. 1). Furthermore, new sediment input seawards may occur only during heavy rain or storm episodes.

The meaningful relationship between beach face slope and sorting may be because of the concentration of well to moderately sorted values of beach sands on the western coast, from 0.4 to 1.0 ϕ in slopes from 4° to 14°, which implies that high-slope beaches are composed of coarse and better sorted sands. This has been reported in other studies for beach sands (Krumbein and Graybill 1965, McLean and Kirk 1969). This observation is also supported by findings in other narrow coastal areas, like California, New Zealand, and southwestern Mexico, where moderately sorted, medium to coarse sands are found on the beach (Bascom 1951, Carranza-Edwards 2001, Kasper-Zubillaga and Dickinson 2001).

It can be observed that there is a lack of significant correlation among grain size parameters (fig. 5a–c). Grain size and sorting reflect only the dispersion of grain size fractions of the western coast beach sands probably due to: (a) less selectivity in the coastal processes to concentrate fractions in a specific range of sizes; (b) a narrow coastal plain; and (c) compositional differences in the sands owing to the heterogeneous lithology in the Baja California Peninsula, represented by the presence of carbonate shells with abundances of 31% in the western coast beach sands (Carranza-Edwards *et al.* 1998). The same applies to the skewness and kurtosis values of dispersal that show irregular alongshore patterns in their profiles (fig. 2b).

The correlation between beach face slope and grain size parameters in the western narrow coastal plain implies that beaches with high slopes are composed of coarse and better

el transporte y la redistribución de la arena (Carranza-Edwards *et al.* 1998). Cerca del sitio de Bahía Banderas, sin embargo, las muestras 47 a 54 también muestran cambios significativos en los parámetros del tamaño de grano en comparación con los demás sitios (figs. 1, 2). La arena es una mezcla de granos de gruesos a medianos, pobremente clasificados, con colas hacia los tamaños finos y gruesos y distribuciones platicúrticas y leptocúrticas, indicando que los mecanismos marinos y los rasgos geomorfológicos son los que determinan la distribución de la arena de la playa. Esto es sustentado por: (a) las corrientes litorales de 10 cm s^{-1} dirigidas al noroeste que ejercen un control en la redistribución de la arena, y (b) una planicie costera angosta y una bahía protegida en comparación con la planicie costera en el norte.

La influencia marina puede generar arenas con diferentes "picos" en sus distribuciones del tamaño de grano (fig. 2a). Esto es porque las descargas de los ríos en la costa este controlan, en menor grado, la distribución del tamaño de grano de la arena de playa debido a la construcción de presas y el uso de los tributarios de los ríos para propósitos de irrigación. En contraste, el resto de las localidades presentan arenas medianas y moderadamente clasificadas, con distribuciones casi simétricas y platicúrticas a leptocúrticas a causa del mayor transporte en una planicie costera más ancha (fig. 2b).

La correlación significativa entre la pendiente de la cara de la playa y el tamaño de grano probablemente se deba a la redistribución de la arena en una planicie costera ancha, lo cual genera arenas más finas y mejor clasificadas que las de la costa oeste. Esta interpretación es sustentada por la correlación observada en la costa del Pacífico de la Península de Baja California, donde se encuentra una planicie costera amplia y donde la arena se restringe a un intervalo de tamaño de grano específico (Carranza-Edwards *et al.* 1998). Además, cuando hay poca mezcla de los intervalos de tamaño de grano se observan mejores correlaciones entre la pendiente de playa, el tamaño de grano y la clasificación (Komar 1976).

Las buenas correlaciones entre el tamaño de grano, la clasificación y la asimetría son resultado de una mejor selección de las arenas durante el transporte litoral y del oleaje en una planicie costera ancha. Se observan relaciones similares en arenas de playa donde existe transporte selectivo, reduciendo los intervalos de tamaño de grano y proporcionando arenas moderadamente bien clasificadas con curvas leptocúrticas (Carranza-Edwards 2001). Asimismo, se ha encontrado una buena correlación entre la clasificación y la asimetría en la arena de playa en planicies costeras anchas del suroeste de España (Anfuso *et al.* 1999). La correlación entre la pendiente de la cara de la playa y los parámetros del tamaño de grano en zonas con una planicie costera amplia sugiere una mejor distribución y mayor transporte de la arena de playa. La correlación entre los parámetros del tamaño de grano en una planicie costera ancha es controlada por la mayor selectividad de la arena durante el transporte litoral y por el oleaje.

En este estudio, los sedimentos más finos y mejor clasificados tienen los valores más altos de asimetría negativa para la

sorted sands. Besides, correlations among grain size parameters in the narrow coastal plain are controlled by less selective transport and different composition, especially biogenic debris affecting the sands. In narrow coastal areas with heights above 1000 m, like Calabria (Italy), it has been observed that a decrease in grain size corresponds to a decrease in skewness, suggesting high variability in grain size parameters of the beach sands due to a high relief in the area, ranging from 5° to 40° (Ibbeken and Schleyer 1991). In Calabria, the area is also composed of gravel-sized fractions that reflect the textural immaturity of the sediments and can be compared to the textural immaturity of the sands of the western coast of the Gulf of California associated with a narrow and steep coast.

Eastern coast beach sands

Average grain size and sorting values for the eastern coast beach sands are similar to those reported for the southern coast of the Gulf of Mexico (Carranza-Edwards 2001), where a wide coastal plain is present. This suggests that a wide coastal plain and waves, especially on the southeastern Gulf of California coast, may generate grain size distribution affinities between wide coastal areas. Beach face slopes of 4° are characterized by medium to fine sands (Shepard 1973), probably due to the piling-up effect of finer grains transported during the run-up in wide coastal plains.

In the particular case of sample 31, its unpredictable behavior in the alongshore profile can be attributed to the presence of a very narrow coastal plain in this area that avoids the transport and redistribution of the sands (Carranza-Edwards *et al.* 1998). Near the Banderas Bay site, however, samples 47 to 54 also show significant changes in the grain size parameters compared with the rest of the beach locations (figs. 1, 2). Sands are a mixture of coarse and medium, poorly sorted grains, with tails towards the fine and coarse sizes and platikurtic and leptokurtic distributions, suggesting that marine mechanisms and geomorphological features characterize the beach sand distribution. This is supported by: (a) the longshore currents with a northwestern direction of 10 cm s^{-1} that exert a control in the redistribution of the sands, and (b) a narrow coastal plain and protected bay compared with the coastal plain in the north.

The marine influence might generate sands with different "peaks" in their grain size distributions (fig. 2a). This is because river discharges along the eastern coast control, to a lesser extent, the grain size distributions of the beach sands due to the dam construction landwards and the use of river tributaries for irrigation purposes. In contrast, the rest of the localities have medium, moderately sorted sands, with near-symmetrical and platikurtic and leptokurtic distributions due to the longer transport in a wider coastal plain (fig. 2b).

The significant correlation between beach face slope and grain size is probably due to the redistribution of the sands in a wide coastal plain that generates finer and better sorted sands than those from the western coast. This interpretation is supported by the correlation observed for the Pacific coast of the Baja California Peninsula, where a wide coastal plain is

arena de la costa este (fig. 5a, b). Estos resultados concuerdan con los resultados de los parámetros texturales para arenas de playa de Chile, donde la mayoría de las pendientes de playa van de 2.7° a 7.5° (Pino y Jaramillo 1992) y están dentro del intervalo de los valores medidos para la costa este de la Península de Baja California.

Análisis de agrupamiento para la arena de playa de las costas oeste y este

El análisis de agrupamiento sugiere que la distribución del tamaño de grano podría estar controlada por las corrientes litorales con velocidad media de 10 cm s⁻¹ en la boca del Golfo de California. En contraste, las muestras de arena de Bahía Concepción (al norte de la Bahía de La Paz) son más gruesas que las de Bahía de La Paz, de moderadamente a pobremente clasificadas y con asimetría hacia los granos gruesos. Esto sugiere que las corrientes litorales cerca de Bahía Concepción ejercen poco control en la distribución y el transporte de la arena de playa, lo que es sustentado por la baja velocidad de la corriente litoral en la zona en comparación con la de la boca del golfo.

El análisis muestra que los parámetros del tamaño de grano de las muestras que se agrupan al lado izquierdo del dendrograma están asociados con una planicie costera amplia, mientras que los de las pocas muestras agrupadas del lado derecho están relacionados con los procesos costeros cerca de la boca del golfo. El análisis de agrupamiento provee información adicional que sustenta las tendencias del tamaño de grano y las correlaciones entre los parámetros del tamaño de grano.

Utilidad de los diagramas bivariantes para los parámetros texturales

De este estudio se puede establecer que las gráficas de mayor utilidad entre los parámetros texturales y la pendiente de la cara de la playa para una planicie costera ancha son las que contrastan pendiente de playa, tamaño medio de grano y clasificación. Diagramas similares han mostrado su efectividad para la arena de costas amplias en el noroeste de México (Carranza-Edwards *et al.* 1998) y de playas con granos medianos y bien clasificados con promedios de pendiente entre 4° y 5° (Shepard 1973).

Agradecimientos

Este trabajo fue apoyado por el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología (UNAM) a través del proyecto titulado "Sedimentología de playas mexicanas". Agradecemos a G Bocanegra, A Galán, A Aguirre, S Santiago, M Mendelewics, y J Reyes su ayuda durante los viajes de campo y en el laboratorio.

Traducido al español por Christine Harris.

observed and where sands are confined to a specific grain size range (Carranza-Edwards *et al.* 1998). Besides, when little mixing in the grain size ranges occurs, better correlations are observed among beach face slope, grain size, and sorting (Komar 1976).

Good correlations among grain size, sorting, and skewness are due to better selection of the sands during longshore transport and wave surf in a wide coastal plain. Similar relationships are observed in beach sands where selective transport occurs, reducing the grain size ranges to medium sands and giving moderately well sorted sands with leptokurtic curves (Carranza-Edwards 2001). Additionally, a good correlation between sorting and skewness in beach sands has been observed in wide coastal plains in southwestern Spain (Anfuso *et al.* 1999). Correlation between beach face slope and grain size parameters in areas with a wide coastal plain suggests better distribution and long transport of the beach sand. In addition, correlation among grain size parameters in a wide coastal plain is controlled by the better selection of the sands during longshore transport and wave surf.

In this study, the finest and better sorted sediments have the highest values of negative skewness for the eastern coast beach sands (fig. 5a, b). These results agree with the textural parameter results for beach sands from Chile, where most beach slopes are between 2.7° and 7.5° (Pino and Jaramillo 1992) and are within the range of the values measured for the eastern coast of the Baja California Peninsula.

Cluster analysis for the western and eastern coast beach sands

The cluster analysis suggests that the grain size distributions might be controlled by the longshore currents with average velocity of 10 cm s⁻¹ at the mouth of the Gulf of California. In contrast, sand samples from Concepción Bay (north of La Paz Bay) are coarser than those from La Paz Bay, moderately to poorly sorted, and coarsely skewed. This suggests that longshore currents near Concepción Bay exert little control in the distribution and transport of beach sands. This is supported by the low longshore current velocity in the area as compared to the longshore current velocity at the mouth of the gulf.

The cluster shows that the grain size parameters of the samples that are grouped on the left side of the dendrogram are associated with a wide coastal plain, whereas those of the few samples that are clustered on the right side are associated with the coastal processes close to the mouth of the Gulf of California. The cluster analysis provides additional information that supports the grain size trends and correlations among grain size parameters.

Usefulness of the bivariate plots for textural parameters

From this study, we can establish that the most useful plots between textural parameters and beach face slope for a wide coastal plain are those between beach face slope, mean grain

Referencias

- Abuodha JOZ. 2003. Grain size distribution and composition of modern dune and beach sediments, Malindi Bay coast, Kenya. *J. Afr. Earth Sci.* 36: 41–54.
- Afuso G, Achab M, Cultrone G, López-Aguayo F. 1999. Utility of heavy minerals distribution and granulometric analyses in the study of coastal dynamics: Application to the littoral between Sanlúcar de Barrameda and Rota (Cadiz, southwest Iberian Peninsula). *Bol. Inst. Esp. Oceanogr.* 15: 243–250.
- Bascom WH. 1951. The relationship between sand size and beach face slope. *Trans. Am. Geophys. Union* 32: 866–874.
- Buoy Weather 2005. A Global Weather Service: <http://buoyweather.com>, accessed on 4 July 2005, 13:00 hours.
- Carranza-Edwards A. 2001. Grain size and sorting in modern sands. *J. Coast. Res.* 17: 38–52.
- Carranza-Edwards A, Bocanegra-García G, Rosales-Hoz L, de Pablo Galán L. 1998. Beach sands from Baja California Peninsula, Mexico. *Sediment. Geol.* 119: 263–274.
- Delgado-González O, Lizárraga-Arciniega R, Martínez-Díaz-de-León A, Galindo-Bect L, Fermán-Almada JL, Sánchez-Arcilla A, Mosso C, Pérez-Higuera R, Cruz-Varela A. 2005. Cambios en la posición de la línea de playa de la boca del Estero de Punta Banda, Baja California, durante 1972–2003. *Cienc. Mar.* 31: 707–717.
- Emery KO. 1978. Grain size in laminae of beach sands. *J. Sediment. Petrol.* 48: 1203–1212.
- Fernández-Eguiarte A, Gallegos-García A, Zavala-Hidalgo J. 1990a. Oceanografía Física (Masas de Agua y Mareas de los Mares Mexicanos). Atlas Nacional de México (Sheet IV. 9.1 Summer). Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Fernández-Eguiarte A, Gallegos-García A, Zavala-Hidalgo J. 1990b. Oceanografía Física (Masas de Agua y Mareas de los Mares Mexicanos). Atlas Nacional de México (Sheet IV. 9.2 Winter). Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Folk RL. 1980. Petrology of Sedimentary Rocks. Hemphill Publishing Co., Austin, Texas, 182 pp.
- Friedman, G.M. 1961. Distinction between dune, beach and river sands from their textural characteristics. *J. Sediment. Petrol.* 31: 514–529.
- Ibbeken H, Schleyer R. 1991. Source and Sediment. Springer-Verlag, Berlin, 286 pp.
- Kasper-Zubillaga JJ, Dickinson WW. 2001. Discriminating depositional environments from modern source terranes using modal analysis. *Sediment. Geol.* 143: 149–167.
- Kasper-Zubillaga JJ, Carranza-Edwards A. 2003. Modern sands of the Gulf of Mexico: Discriminating fluvial and coastal sand composition. *Cienc. Mar.* 29: 621–630.
- Khalaf F. 1989. Textural characteristics and genesis of the eolian sediments in the Kuwaiti desert. *Sedimentology* 36: 253–271.
- Köppen W. 1948. Climatología. Fondo de Cultura Económica, México, 478 pp.
- size and sorting. Similar diagrams have proven their effectiveness for beach sands from wide coastal plains in northwestern Mexico (Carranza-Edwards *et al.* 1998) and beaches with medium and well sorted sands with average slopes between 4° and 5° (Shepard 1973).

Acknowledgements

This study was supported by the Instituto de Ciencias del Mar y Limnología (UNAM) through the project entitled “Sedimentology of Mexican Beaches”. We thank G Bocanegra, A Galán, A Aguirre, S Santiago, M Mendelewics and J Reyes for their assistance during field trips and in laboratory activities.

-
- Komar PD. 1976. Beach Processes and Sedimentation. Prentice Hall, New Jersey, 429 pp.
- Komar PD, Inman DL. 1970. Longshore sand transport on beaches. *J. Geophys. Res.* 75: 5914–5827.
- Krumbein WC, Graybill FA. 1965. An Introduction to Statistical Models in Geology. McGraw Hill, New York, 574 pp.
- McLean RF, Kirk RM. 1969. Relationship between grain size, size-sorting and foreshore slope on mixed sand-shingle beaches. *N.Z. J. Geol. Geophys.* 12: 138–155.
- Pérez-Villegas G. 1990. Vientos Dominantes. Atlas Nacional de México (Wind Sheet IV.4.2). Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Pettijohn FJ, Potter PE, Siever R. 1972. Sand and Sandstones. Springer Verlag, New York, 618 pp.
- Pino M, Jaramillo E. 1992. Morphology, texture and mineralogical composition of sandy beaches in the south of Chile. *J. Coast. Res.* 8: 593–602.
- Potter PE. 1986. South America and a few grains of sand. Part I. Beach sands. *J. Geol.* 94: 301–319.
- Sevon WD. 1964. Sediment variation on Farewell Spit, New Zealand. *N.Z. J. Geol. Geophys.* 9: 60–75.
- Shepard FP. 1973. Submarine Geology. Harper and Row, New York, 517 pp.
- Shepard FP, LaFond EC. 1940. Sand movements near the beach in relation to tides and waves. *Am. J. Sci.* 238: 272–285.
- Tamayo JL. 2002. Geografía Moderna de México. Editorial Trillas, México, 512 pp.
- Thompson RW. 1968. Tidal flat sedimentation on the Colorado River delta, northwestern Gulf of California. *Bull. Geol. Soc. Am. Mem.* (107).

*Recibido en mayo de 2006;
aceptado en diciembre de 2006*