

Análisis por microscopía electrónica de barrido de granos de cuarzo de dunas desérticas y costeras (Desierto de Altar, NW México)

Scanning electron microscopy analysis of quartz grains in desert and coastal dune sands (Altar Desert, NW Mexico)

JJ Kasper-Zubillaga¹, R Faustinos-Morales²

¹ Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México, Geología Marina y Ambiental, Circuito Exterior s/n, 04510 Mexico DF, México. E-mail: kasper@icmyl.unam.mx

² Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior, 04510 México DF, Mexico.

Resumen

Un análisis en el microscopio electrónico de barrido se realizó a 570 granos de cuarzo de dunas desérticas y costeras en el noroeste de México. Nuestro objetivo principal es el de presentar una nueva aplicación en el uso de diagramas ternarios con límites logísticos de confianza en datos normalizados basados en rasgos superficiales del cuarzo (datos cerrados). Esto se realizó para demostrar que los rasgos superficiales del cuarzo de dunas desérticas y costeras no son significativamente diferentes a pesar de que hay ciertos procesos dominantes (mecánicos, químicos) que producen estos rasgos superficiales en el cuarzo de ambos tipos de dunas. Esto puede asociarse con el hecho de que el cuarzo depositado en las dunas no refleja un segundo ciclo de transporte asociado a un ambiente eólico debido a su baja madurez textural, procedencia, cercanía a la roca fuente y poco desgaste superficial del grano. Este estudio indica que los granos de cuarzo de las dunas desérticas muestran rasgos asociados al Delta del Río Colorado y fuentes graníticas que no reflejan de manera precisa los mecanismos eólicos que controlan el transporte de estos granos. Asimismo, algunos granos de cuarzo muestran rasgos superficiales de origen químico posiblemente vinculados a la actividad hidrotermal cerca del Delta del Río Colorado. En general, los granos de cuarzo muestran rasgos superficiales bien definidos. El cuarzo de las dunas costeras muestra rasgos superficiales químicos que indican precipitación de agua sobresaturada en sílice y, en menor grado, muestra rasgos superficiales de origen mecánico. Estas similitudes están asociadas a la mezcla de procesos (mecánicos, químicos) en cuarzo de dunas desérticas y costeras.

Palabras clave: dunas desérticas y costeras, rasgos superficiales del cuarzo, microscopio electrónico de barrido, límites logísticos de confianza, análisis factorial.

Abstract

A scanning electron microscopy analysis was performed for 570 quartz grains from desert and coastal dune sands in NW Mexico. Our main goal is to present a new application in the use of ternary diagrams with logistic normal confidence region boundaries of normalized data based on quartz surface textures (i.e., constrained data) of desert and coastal dune sands. This was done to demonstrate that quartz surface textures from desert and coastal dune sands are not significantly different even though there are apparent dominant processes (mechanical, chemical) that produce different surface textures in quartz grains from both dune types. This may be associated with the fact that quartz grains deposited in the dune sands do not reflect a second cycle of transport associated with an aeolian environment because of their low textural maturity, provenance, closeness to the source rock, and little attrition process. This study indicates that quartz grains from the desert dunes display mechanical textures probably associated with the Colorado River Delta and granitic sources that do not reflect accurately the aeolian mechanisms controlling the transport of these grains. Also, some quartz grains display chemical surface textures probably linked to the hydrothermal activity near the Colorado River Delta. In general, quartz grains display conspicuous surface textures. Quartz from coastal dune sands displays chemical surface textures that indicate quartz precipitation from silica-saturated water and, to a lesser extent, it displays mechanical features. These similarities might be associated with the mixing of processes (mechanical, chemical) in quartz from the desert and coastal dune sands.

Key words: desert and coastal dune sands, quartz surface textures, scanning electron microscopy (SEM), logistic normal confidence region boundaries (LNCRB), factor analysis.

Introducción

Los estudios sobre los rasgos superficiales de los granos de cuarzo mediante microscopía electrónica de barrido han sido ampliamente utilizados para investigar los procesos físicos y

Introduction

Studies of surface textures in quartz grains with scanning electron microscopy (SEM) have been widely used to investigate the physical and chemical processes that take place in

químicos que suceden en diversos ambientes sedimentarios (Krinsley y Donahue 1968, Margolis y Krinsley 1974, Middleton y Davis 1979, Mazzullo *et al.* 1986, Pye y Mazzullo 1994, Moral-Cardona *et al.* 1997, Al-Hurban y Gharib 2004, Kasper-Zubillaga *et al.* 2005). Se han realizado algunos estudios sobre las arenas de dunas costeras tropicales para determinar el tipo de transporte, la composición y la deposición de los granos de cuarzo durante su ciclo sedimentario (Krinsley y Donahue 1968, Pye y Mazzullo 1994, Kasper-Zubillaga y Carranza-Edwards 2003). Los efectos de la abrasión mecánica y/o química sobre el cuarzo determinan la textura superficial de este mineral. Por ejemplo, las fracturas conoidales, las superficies lisas, las formas en V de origen mecánico y las estrías lineales o curvas están asociadas con la abrasión mecánica en ambientes marinos y eólicos de energía alta/mediana/baja, mientras que las cavidades de disolución, el grabado y los depósitos de sílice son característicos de una influencia química sobre la morfología del cuarzo en áreas tropicales o saturadas en sílice como las zonas intermareales (Le Ribault 1975, Higgs 1979, Moral-Cardona *et al.* 1997). En regiones húmedas como la costa oriental de Australia o la parte norte de Nueva Zelanda, los granos relictos de cuarzo de dunas han desarrollado rasgos superficiales de origen químico debido a los procesos de podzolización (Schofield 1970, Pye y Mazzullo 1994, Kasper-Zubillaga *et al.* 2005). En el presente estudio, es probable que los granos relictos de cuarzo de dunas desérticas y costeras estén más relacionados con procesos mecánicos (transporte fluvial, corrientes paralelas a la costa, vientos) a causa de la sequedad de la región; sin embargo, algunos de los granos de cuarzo de las dunas costeras podrían haber desarrollado rasgos superficiales por procesos químicos debido a su cercanía al agua de mar.

Este estudio presenta una nueva aplicación de los diagramas ternarios con límites logísticos de confianza (LLC) (Weltje 2002) en datos normalizados basados en los rasgos superficiales del cuarzo (i.e., datos cerrados) de dunas desérticas y costeras. Los LLC de una población representan el área dentro de la cual las muestras podrían tener variaciones en relación con la media (Weltje 2002). En este trabajo se muestra cómo los rasgos superficiales de los granos de cuarzo no necesariamente reflejan un segundo ciclo de transporte asociado con un ambiente eólico debido a su baja madurez textural en las dunas. Este trabajo preliminar basado en los rasgos superficiales del cuarzo podría ayudar a elucidar algunos de los mecanismos que producen arenas de dunas, su procedencia, cercanía a la roca fuente y poco desgaste superficial en una zona dominada por el Delta del Río Colorado y rocas graníticas.

Área de estudio

El área de estudio se localiza en el Desierto de Altar en Sonora, en el noroeste de México (fig. 1). Se muestrearon las dunas desérticas en las áreas de San Luis Río Colorado y El Pinacate, y las dunas costeras en las áreas del Golfo de Santa Clara y Puerto Peñasco (fig. 1).

different sedimentary environments (Krinsley and Donahue 1968, Margolis and Krinsley 1974, Middleton and Davis 1979, Mazzullo *et al.* 1986, Pye and Mazzullo 1994, Moral-Cardona *et al.* 1997, Al-Hurban and Gharib 2004, Kasper-Zubillaga *et al.* 2005). Some studies have been performed on tropical coastal dune sands to interpret the type of transport, composition and deposition of quartz grains during their sedimentary cycle (Krinsley and Donahue 1968, Pye and Mazzullo 1994, Kasper-Zubillaga and Carranza-Edwards 2003). The effects of mechanical and/or chemical abrasion on quartz determine the surface texture of this mineral. For example, conchoidal fractures, smooth surfaces, mechanical V-forms, and linear or curved grooves are linked to mechanical abrasion in high/medium/low energy marine and eolian environments, whereas solution pits, etching, and silica deposits are characteristic of a chemical influence on the quartz morphology in tropical or silica-saturated areas like the intertidal zones of the beach (Le Ribault 1975, Higgs 1979, Moral-Cardona *et al.* 1997). In humid areas like the eastern coast of Australia and the northern part of New Zealand, relict quartz grains in dune sands have developed chemical surface textures due to a podzolisation process (Schofield 1970, Pye and Mazzullo 1994, Kasper-Zubillaga *et al.* 2005). In our study, relict quartz grains from desert and coastal dune sands are probably more associated with mechanical processes (fluvial transport, longshore currents, winds) because of the dryness of the area; however, it is possible that some quartz grains from the coastal dune sands are associated with chemical surface textures because of their closeness to the seawater.

This study shows a new application in the use of ternary diagrams with logistic normal confidence region boundaries (LNCRB) (Weltje 2002) of normalized data based on quartz surface textures (i.e., constrained data) of desert and coastal dune sands. The LNCRB of a population represent the area in which samples might have variations in relation to the mean (Weltje 2002). In this paper we show how surface textures in quartz grains do not necessarily reflect a second cycle of transport associated with an aeolian environment probably due to the low textural maturity of the quartz grains in the dune sands. This preliminary work based on surface textures in quartz grains may help to elucidate some of the mechanisms that produce dune sands, their provenance, closeness to the source sediment, and little attrition process in an area dominated by the Colorado River Delta and granitic rocks.

Study area

The study area is located in the Altar Desert in Sonora, in northwestern Mexico (fig. 1). Desert dunes were sampled in the San Luis Río Colorado and El Pinacate areas, and coastal dunes in the Gulf of Santa Clara and Puerto Peñasco areas (fig. 1).

This dry region has an average annual rainfall of less than 10 cm, and 60–80% of the total rainfall occurs during the July–September season (Stensrud *et al.* 1997).

Esta región seca tiene una precipitación media anual de menos de 10 cm, y entre 60% y 80% de ésta ocurre de julio a septiembre (Stensrud *et al.* 1997).

En la región, los vientos dominantes soplan de 20% a 60% del tiempo del noroeste y noreste hacia la costa, con velocidades de 2 a 6 m s⁻¹. En Puerto Peñasco, los vientos del sur que soplan hacia la costa tienen una velocidad de 2 a 4 m s⁻¹ y ocurren 60% del tiempo en un mes (Pérez-Villegas 1990). Esto fue corroborado durante la época de muestreo (otoño e invierno). Muhs *et al.* (2003) encontraron que los vientos del noroeste en la zona de las dunas de Los Algodones, cerca de la frontera de México con los Estados Unidos, tienen un potencial de deriva anual de 50 a 150 unidades vectoriales (terminología de Fryberger y Dean 1979), lo cual provoca la migración de dunas hacia el Desierto de Altar en México. Según Lancaster (1989), los vientos del noroeste generan de 25% a 30% del transporte potencial de arena anual en este desierto.

Una corriente paralela a la costa en la parte norte del Golfo de California genera transporte de sedimentos del sureste al noroeste (Fernández-Eguiarte *et al.* 1990a, b). Por otro lado, las mareas, semidiurnas y de hasta 10 m de amplitud, también redistribuyen el sedimento en la zona costera debido a la influencia que ejercen sobre el transporte de arenas (Thompson 1968, Cupul 1994).

Las descargas fluviales de los ríos Colorado y Sonoyta afectan la composición y distribución de las dunas de arena. Aunque el Colorado ya no es un río activo que descargue agua y sedimentos al Golfo de California, su delta domina el abastecimiento de arena a los campos de dunas del Desierto de Altar (Merriam 1969, Blount y Lancaster 1990, Kasper-Zubillaga *et al.* 2006). El Río Sonoyta fluye intermitentemente a través de la parte sur del Desierto de Altar (fig. 1).

De acuerdo con Blount y Lancaster (1990), las dunas desérticas y costeras son lineales, transversales y media luna.

Metodología

Durante el otoño de 2002, se recolectaron 19 muestras de arenas de las dunas desérticas y costeras en Sonora (México). Las muestras fueron tomadas de la cresta y el costado de la duna. Se llevó a cabo un análisis del tamaño de las partículas en un analizador por difracción láser (Coulter LS230). El tamaño de grano se determinó para las fracciones finas y medianas. Los granos de cuarzo fueron separados a mano del resto de los sedimentos utilizando una aguja pequeña, y se recubrieron con una capa de oro mediante un aparato Fine Coat JFC-1100. Se utilizó un microscopio electrónico de barrido (modelo JEOL-JSM-6360LV) para observar 30 granos por muestra (tabla 1). El análisis por conteo de puntos de los granos de cuarzo se realizó al azar, escogiendo diferentes granos. Rasgos dominantes como formas en V de origen mecánico, fracturas concoidales, superficies lisas, estrías lineales o curvas, cavidades de disolución, grabado y precipitación de sílice, de cada grano, fueron considerados para el conteo, con base en los trabajos de Krinsley y Donahue (1968), Moral-Cardona *et*

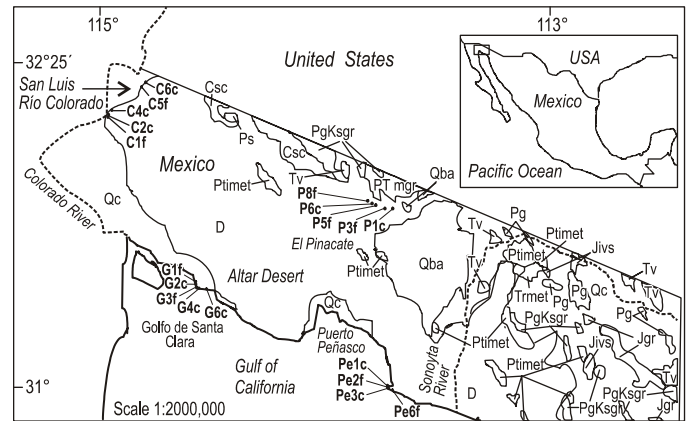


Figura 1. Área de estudio: geología y sitios de muestreo. Las unidades volcánicas y sedimentarias son: Qba = rocas volcánicas del Cuaternario (andesitas y basaltos), Tv = rocas volcánicas continentales (Mesozoico), Jvs = unidades vulcanosedimentarias (Jurásico), Csc = unidades sedimentarias continentales (Cenozoico), Ps = unidades sedimentarias marinas (Paleozoico superior), Qc = unidades sedimentarias continentales (Cuaternario) y D = dunas de arenas. Las unidades metamórficas y plutónicas son: Ptmet = unidades metamórficas (Proterozoico), Trmet = unidades metamórficas (Triásico), PgKsgr = rocas graníticas (Cretácico superior a Cenozoico temprano), Pg = rocas graníticas (Cretácico superior) y Jgr = rocas graníticas (Jurásico).

Figure 1. Study area: geology and sampling sites. Volcanic and sedimentary units are: Qba = Quaternary volcanic rocks (andesites and basalts), Tv = continental volcanic rocks (Mesozoic), Jvs = volcano-sedimentary units (Jurassic), Csc = continental sedimentary units (Cenozoic), Ps = marine sedimentary units (Upper Paleozoic), Qc = continental sedimentary units (Quaternary), and D = sand dunes. Metamorphic and plutonic units are: Ptmet = metamorphic (Proterozoic), Trmet = metamorphic (Triassic), PgKsgr = granitic rocks (Upper Cretaceous to Early Cenozoic), Pg = granitic rocks (Upper Cretaceous), and Jgr = granitic rocks (Jurassic).

Onshore winds coming from the NW and NE with velocities of 2–6 m s⁻¹ prevail in the region, occurring 20–60% of the time during one month. In the Puerto Peñasco area, southerly onshore winds have velocities of 2–4 m s⁻¹ and occur 60% of the time during one month (Pérez-Villegas 1990). This was corroborated during the sampling season (autumn/winter). Muhs *et al.* (2003) have also shown that northwesterly winds near Los Algodones dune fields, close to the US-Mexico border, have a resultant annual drift potential of 50–150 vector units (terminology of Fryberger and Dean 1979), inducing dune migration into the Altar Desert in Mexico. According to Lancaster (1989), northwesterly winds generate 25–30% of the annual potential sand transport in the Altar Desert dunes.

A longshore current in the coastal area of the northern Gulf of California generates sediment transport from the SE to the NW (Fernández-Eguiarte *et al.* 1990a, b). Semidiurnal tides, however, with up to 10 m amplitude, also redistribute the sediment in the coastal area due to their potential influence on the transport of sands (Thompson 1968, Cupul 1994).

The fluvial discharges that influence the composition and distribution of the dune sands are the Colorado and Sonoyta rivers. Even though the Colorado River is no longer an active

al. (1997, 2005) y Gutiérrez-Mas *et al.* (2003). Dichos rasgos fueron considerados como la yuxtaposición de texturas para cada grano sobre otras texturas menores (placas invertidas, arcos escalonados, fracturas concoidales lisas). Se tomaron microfotografías de cada grano observado.

Para graficar los diagramas ternarios con LLC, se normalizaron los datos a 100% para cada muestra ($n = 30$ granos) (tabla 2). Los LLC fueron computarizados utilizando el algoritmo desarrollado por Weltje (2002).

En el diagrama ternario, el vértice A representa (I) las formas mecánicas en V más (II) las estrías lineales o curvas asociadas con ambientes acuosos de alta energía (i.e., zona de oleaje de la playa). El vértice B representa (III) las fracturas concoidales más (IV) las superficies lisas asociadas con ambientes acuosos de alta energía (litoral y fluvial) y transporte eólico, respectivamente. El vértice C representa (V) las cavidades de disolución y grabado más (VI) la precipitación de sílice asociada con la disolución química y la precipitación por el agua (Krinsley y Donahue 1968, Moral-Cardona *et al.* 2005). Éste fue un planteamiento general para distinguir los procesos que controlan la textura superficial del cuarzo, y el estudio se limitó a los rasgos más conspicuos en la superficie de los granos.

Adicionalmente, se realizó un análisis factorial (modo R) a fin de interpretar los procesos mecánicos y/o químicos que controlan la morfología y los rasgos superficiales de los granos de cuarzo de las dunas desérticas y costeras. Este análisis permite seleccionar las texturas superficiales dominantes de los granos mediante la transformación de variables en factores (Swan y Sandilands 1995, Voudouris *et al.* 1997). Los análisis estadísticos se llevaron a cabo utilizando la paquetería Estadística.

Resultados

Las arenas de San Luis Río Colorado, El Pinacate, Golfo de Santa Clara y Puerto Peñasco son de grano fino a medio y de moderadamente a bien clasificadas. Las arenas de dunas desérticas promediaron 2.33 ϕ , mientras que las costeras promediaron 1.71 ϕ , con promedios de clasificación de 0.74 y 0.71 ϕ , respectivamente (Kasper-Zubillaga y Carranza-Edwards 2005). Se construyó un diagrama ternario con LLC al 95% para la media de los conteos normalizados para las arenas de dunas desérticas ($n = 10$) y costeras ($n = 9$) (fig. 2a). Para evaluar el efecto de tendencias inesperadas en las muestras graficadas en el diagrama ternario, las muestras C4c, P1c y P5f (dunas desérticas), y G1f y G2c (dunas costeras) fueron retiradas de los conjuntos de datos de dunas desérticas y costeras, respectivamente (fig. 2b), a fin de determinar la mejor localización de las poblaciones medias más realistas de ambos conjuntos. Se puede observar, a partir de la media, que 45% de los granos de cuarzo de las dunas desérticas se localizan cerca del vértice de las fracturas concoidales y superficies lisas, mientras que 40% de los granos de cuarzo de las dunas costeras

river that discharges water and sediments into the Gulf of California, its delta dominates the sand supply to the dune fields of the Altar Desert (Merriam 1969, Blount and Lancaster 1990, Kasper-Zubillaga *et al.* 2006). The Sonoyta River flows intermittently throughout the southern part of the Altar Desert (fig. 1).

According to Blount and Lancaster (1990), the desert and coastal dunes are linear and crescentic.

Methodology

During the autumn of 2002, 19 sand samples were collected from the desert and coastal dunes in Sonora (Mexico). Samples were taken from the crest and the flank of the dune. Particle-size analysis was carried out using a Coulter LS230 laser particle-size analyzer. Grain-size determinations were obtained for the fine to medium size fractions. Quartz grains were separated from the whole bulk sediments by hand picking using a small needle. Mounted quartz grains were gold-coated in a JFC-1100 Fine Coat apparatus. A scanning electron microscope (model JEOL-JSM-6360LV) was used to observe 30 grains per sample (table 1). Point-counting of the quartz grains was randomly performed by choosing different quartz grains. The dominant textures, like mechanical V forms, conchoidal fractures, smooth surfaces, linear or curved grooves, solution pits, etching and silica precipitation, in each grain were considered for counting purposes, based on previous works by Krinsley and Donahue (1968), Moral-Cardona *et al.* (1997, 2005) and Gutiérrez-Mas *et al.* (2003). These features were considered as the juxtaposition of textures for each grain over other minor textures (upturned plates, arcuate steps, smooth conchoidal fractures). Photomicrographs were taken for each grain observed.

In order to plot ternary diagrams with LNCRB, the data were normalized to 100% for each sample ($n = 30$ grains) (table 2). The LNCRB were computed using the algorithm developed by Weltje (2002).

In the ternary diagram, pole A represents (I) mechanical V-forms plus (II) linear or curved grooves associated with high-energy water environments (i.e., surf zone of the beach). Pole B represents (III) conchoidal fractures plus (IV) smooth surfaces associated with high-energy aqueous environments (littoral and fluvial) and aeolian transport, respectively. Pole C represents (V) solution pits and etching plus (VI) silica precipitation associated with chemical dissolution and precipitation by water (Krinsley and Donahue 1968, Moral-Cardona *et al.* 2005). This was a general approach to distinguish the processes that control the surface texture of quartz. Our study was limited to the most conspicuous surface textures observed in the quartz grains.

Additionally, an R-mode factor analysis was performed to interpret the mechanical and/or chemical processes that control the morphology and surface textures of the quartz grains from desert and coastal dune sands. This analysis allows the selection of the dominant surface textures of the quartz grains

Tabla 1. Número de granos de cuarzo con rasgos superficiales de las muestras de dunas ($n = 19$). I = formas V de origen mecánico, II = estrías lineales o curvas, III = fracturas concoidales, IV = superficies lisas, V = cavidades de disolución y grabado, VI = precipitación de sílice, Mz = tamaño de grano (ϕ) y σ = clasificación (ϕ).

Table 1. Number of quartz grains with surface features of dune samples ($n = 19$). I = mechanical V-forms, II = linear or curved grooves, III = conchoidal fractures, IV = smooth surfaces, V = solution pits and etching, VI = silica precipitation, Mz = grain size (ϕ), and σ = sorting (ϕ).

Sample	I	II	III	IV	V	VI	Mz	σ
San Luis Río Colorado								
C1f	2	1	9	8	6	4	2.52	1.60
C2c	3	2	7	8	3	7	1.96	1.00
C4c	3	5	8	2	1	11	2.09	0.93
C5f	5	1	15	5	1	3	1.96	1.13
C6c	3	5	6	6	2	8	2.06	0.77
El Pinacate								
P1c	5	2	6	5	6	7	2.56	0.44
P3f	6	2	8	8	1	5	2.46	0.38
P5f	3	2	7	1	5	12	2.54	0.38
P6c	2	1	13	4	1	9	2.63	0.42
P8f	1	11	3	7	1	7	2.59	0.38
Gulf of Santa Clara								
G1f	8	1	9	2	1	9	1.82	0.78
G2c	3	3	9	6	1	8	1.47	0.53
G3f	1	1	8	6	1	13	1.85	0.65
G4c	5	7	5	3	3	7	1.62	0.53
G6c	5	7	5	3	3	7	1.72	0.57
Puerto Peñasco								
Pe1c	2	4	8	3	1	12	1.60	0.73
Pe2f	3	4	7	4	1	11	1.69	0.70
Pe3c	2	2	5	1	1	19	1.79	0.97
Pe6f	5	3	9	1	5	7	1.90	0.94

se encuentran cerca del vértice de los rasgos de origen químico (fig. 2a, b). La dispersión menor en los LLC de las muestras de cuarzo de dunas desérticas, en comparación con la dispersión mayor de las de dunas costeras se debe a la gran cantidad de muestras de cuarzo provenientes de las dunas desérticas, lo que produce una mejor estimación de la localización de la media (Weltje, com. pers.). Las observaciones individuales afuera de los LLC para el cuarzo de dunas desérticas y costeras están asociadas con la variación natural de los rasgos superficiales de los granos de ambos tipos de dunas (fig. 2a). El traslape entre los LLC de las dunas desérticas y costeras sugiere una mezcla de procesos mecánicos y químicos que producen diferentes texturas superficiales en el cuarzo. Los patrones de dispersión y traslape que llenan la mayor parte del diagrama ternario también han sido demostrados para los datos composicionales de arenas de río, en los que las regiones pronosticadas en los diagramas ternarios se extienden más allá de los datos de dispersión y los puntos “anómalos” representando una

by the transformation of variables into factors (Swan and Sandilands 1995, Voudouris *et al.* 1997). Statistical analyses were performed using the Statistica software.

Results

Sands from the San Luis Río Colorado, El Pinacate, Gulf of Santa Clara, and Puerto Peñasco areas are fine- to medium-grained and moderately- to well-sorted. Average phi values for the desert and coastal dune sands were 2.33 and 1.71 ϕ , with average sorting values of 0.74 and 0.71 ϕ , respectively (Kasper-Zubillaga and Carranza-Edwards 2005). A ternary plot with LNCRB at 95% was drawn for the mean of normalized counts for the desert ($n = 10$) and coastal ($n = 9$) dune sands (fig. 2a). In order to estimate the effect of unexpected trends in the samples plotted in the ternary diagram, samples C4c, P1c and P5f (desert dunes), and G1f and G2c (coastal dunes) were removed from the desert and coastal dune data sets, respectively (fig. 2b). This was done to estimate the best

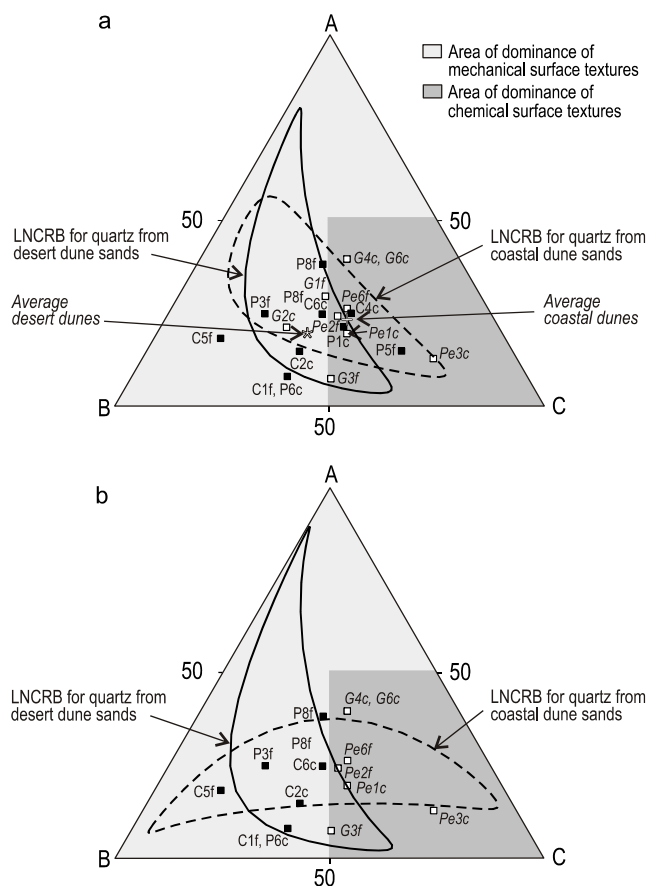


Figura 2. Diagrama ternario con límites logísticos de confianza (LLC) al 95% de nivel de confianza (Weltje 2002) para (a) el conjunto de datos total y (b) sin las muestras C4c, P1c y P5f (dunas desérticas) y G1f y G2c (dunas costeras). Los cuadrados negros indican las muestras de cuarzo de las dunas desérticas y los blancos, las muestras de cuarzo de las dunas costeras. Los vértices están representados por: A = formas V de origen mecánico + estrías lineales y curvas, B = fracturas conchoidales + superficies lisas, y C = cavidades de disolución y grabado + precipitación de sílice.

Figure 2. Ternary plots with logistic normal confidence region boundaries (LNCRB) at 95% confidence levels (Weltje 2002) for (a) the whole data set and (b) removing samples C4c, P1c and P5f (desert dunes) and G1f and G2c (coastal dunes). Shaded squares indicate quartz samples from desert dune sands. Open squares indicate quartz grains from coastal dune sands. Poles are represented by: A = mechanical V-forms + linear and curved grooves, B = conchoidal fractures + smooth surfaces, and C = solution pits and etching + silica precipitation.

composición diferente que los demás datos analizados (Robinson y Johnsson 1997, Weltje 2002).

El análisis factorial (modo R) agrupó sólo los rasgos superficiales lisos y los parámetros del tamaño de grano como las cargas positivas más significativas representadas en dos factores, probablemente debido a la dominancia de los procesos mecánicos en las texturas superficiales globales del cuarzo de las dunas del Desierto de Altar (tabla 3). El segundo factor agrupó las estrías lineales o curvas y las fracturas conchoidales. El tercer factor no agrupó ninguna variable (tabla 3, fig. 3).

Tabla 2. Rasgos superficiales del cuarzo expresados en porcentajes.
Table 2. Quartz surface textures expressed in percentages.

Sample	A	B	C
Desert dunes			
C1f	10.0	56.7	33.3
C2c	16.7	50.0	33.3
C4c	26.7	33.3	40.0
C5f	20.0	66.7	13.3
C6c	26.7	40.0	33.3
P1c	23.3	36.7	40.0
P3f	26.7	53.3	20.0
P5f	16.6	26.7	56.7
P6c	10.0	56.7	33.3
P8f	40.0	33.3	26.7
Coastal dunes			
G1f	30.0	36.7	33.3
G2c	20.0	50.0	30.0
G3f	30.0	6.7	46.7
G4c	40.0	26.7	33.3
G6c	40.0	26.7	33.3
Pe1c	20.0	36.7	43.3
Pe2f	23.3	36.7	40.0
Pe3c	13.3	20.0	66.7
Pe6f	26.7	33.3	40.0

A = mechanical V-forms + linear and curved grooves.

B = conchoidal fractures + smooth surfaces.

C = solution pits and etching + silica precipitation.

location of the most realistic mean populations for both data sets. It can be observed from the mean that 45% of the quartz grains of the desert dunes are located near the conchoidal fracture and smooth surface pole, whereas 40% of the quartz grains from the coastal dune sands are located near the chemically-produced texture pole (fig. 2a, b). A smaller dispersal in the LNCRB of the quartz samples from desert dunes compared with the larger dispersal of those from coastal dunes is due to the large amount of quartz samples from desert dune sands that produce a better estimation of the location of the mean (Weltje, pers. comm.). Individual observations outside the LNCRB for quartz from desert and coastal dune sands are associated with the natural variation of the surface textures in quartz grains in both dune systems (fig. 2a). The overlap between the LNCRB of desert and coastal dune sands suggests a mixing of mechanical and chemical processes that produce different surface textures in the quartz. Dispersal and overlap patterns that fill most of the ternary diagram have also been shown for compositional data of river sands, in which predicted regions in the ternary diagram extend beyond the scatter data and also in which "anomalous" points represent a different composition than the rest of the analyzed data (Robinson and Johnsson 1997, Weltje 2002).

The R-mode factor analysis grouped only smooth surface textures and grain size parameters as the most significant positive loadings represented in two factors probably because

Tabla 3. Análisis factorial (rotación varimax) de las arenas de dunas desérticas y costeras. Ver tabla 1 para la explicación de los números romanos.

Table 3. Varimax factor analysis for desert and coastal dune sands. See table 1 for explanation of the Roman numerals.

	Factor 1	Factor 2	Factor 3
I	-0.27	0.07	-0.88
II	0.08	-0.84	0.09
III	-0.00	0.86	-0.12
IV	0.83	0.09	0.15
V	0.33	-0.01	-0.51
VI	-0.63	-0.12	0.62
Mz	0.71	-0.06	-0.12
σ	0.11	0.61	0.08
% Contribution to the total variance by each factor	22.87	23.46	18.70

Bold typeface indicates the most significant factor loadings that group the surface textures.

Discusión

Diagramas ternarios

Texturas del cuarzo de dunas desérticas

Las gráficas de la media y de dispersión hacia el vértice B para el cuarzo de las dunas desérticas sugieren que la mayoría de los granos observados en las muestras C1f, C2c, C5f, C6c, P3f, P6c y P8f (fig. 2a, tabla 2) probablemente se originaron en ambientes de alta energía, como la cuenca del Río Colorado y las fuentes graníticas en la parte norte de los campos de dunas de El Pinacate (Krinsley y Donahue 1968, Carriquiry *et al.* 2001). Esto se debe a que, al igual que el ambiente de playa, un ambiente fluvial ejerce un transporte hidráulico muy energético que genera las fracturas concoidales (Gutiérrez-Mas *et al.* 2003). En el presente estudio las fracturas concoidales dominantes fueron irregulares (fig. 4), las cuales son distintivas de un ambiente de alta energía (Krinsley y Donahue 1968). No obstante, algunos granos podrían haber sido expuestos a ciclos previos de transporte y sedimentación, como aquellos que exhiben fracturas concoidales y superficies lisas (fig. 4) que indican un primer periodo de alta energía fluvial y luego un periodo de transporte eólico que produce bordes lisos. Asimismo, los granos con estrías lisas y pulidas (fig. 4) podrían haber sido transportados por el viento después de un periodo de energía fluvial altamente abrasiva (Krinsley y Margolis 1969, Margolis y Kennet 1971, Higgs 1979). Esto sugiere que los rasgos superficiales de estas muestras estuvieron sujetos a cortos periodos de abrasión por el viento probablemente debido a su cercanía a las rocas fuentes de la cuenca del Río Colorado y las fuentes graníticas cerca de las dunas de El Pinacate. Algunas muestras (P6c) mostraron placas invertidas que podrían ser resultado de la acción del viento (Al-Hurban y Gharib 2004)

of the dominance of mechanical processes in the overall surface textures of quartz in the Altar Desert dunes (table 3). The second factor grouped linear or curved grooves and conchoidal fractures. The third factor did not group any variable (table 3, fig. 3).

Discussion

Ternary diagrams

Quartz textures from desert dunes

The mean and scatter plots towards pole B for the desert dune quartz suggest that the majority of the grains observed in samples C1f, C2c, C5f, C6c, P3f, P6c, and P8f (fig. 2a, table 2) were probably originated in high-energy environments, like the Colorado River basin and granitic sources in the north of El Pinacate dune fields (Krinsley and Donahue 1968, Carriquiry *et al.* 2001). This is because, as well as the beach environment, the fluvial environment exerts a very energetic hydraulic transport that produces conchoidal fractures (Gutiérrez-Mas *et al.* 2003). In our study, the dominant conchoidal fractures were irregular (fig. 4), which are distinctive of a high-energy environment (Krinsley and Donahue 1968). Nevertheless, some grains might have experienced previous cycles of transport and sedimentation, such as those with conchoidal fractures and smooth edges (fig. 4) that reflect a first period of fluvial high energy and then a period of aeolian transport which produces smooth edges. Likewise, grains with smooth or polished linear and curved grooves (fig. 4) may have been transported by the wind after a period of high abrasive fluvial energy (Krinsley and Margolis 1969, Margolis and Kennet 1971, Higgs 1979). This suggests that surface textures in these samples have been subjected to short periods of abrasion by the wind probably because of their closeness to the source rocks, such as the Colorado River Delta and granitic

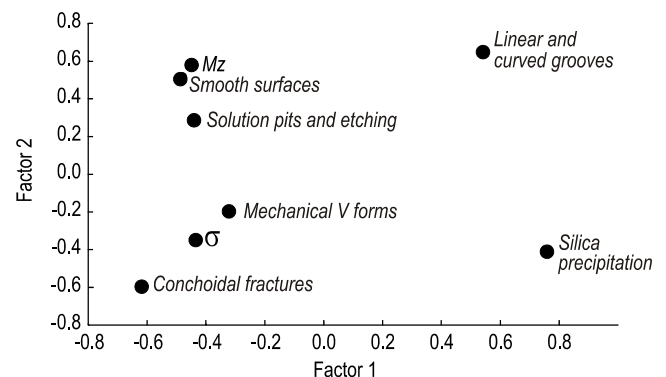


Figura 3. Cargas del análisis factorial de los principales rasgos superficiales de los granos de cuarzo de las dunas desérticas y costeras del Desierto de Altar. Ver tabla 3 para el significado estadístico de la matriz de rotación varimax.

Figure 3. Factor analysis loadings of the principal surface textures in quartz grains from desert and coastal dune sands of the Altar Desert. See table 3 for statistical significance of the varimax rotated matrix.

(fig. 4); sin embargo, la mayoría de los granos de cuarzo adquiere su morfología de los ambientes fluviales de alta energía.

Las muestras C4c, P1c y P5f se inclinan hacia el vértice C (fig. 2a), lo que sugiere que el cuarzo de estos sitios ha sido expuesto a una mezcla de procesos mecánicos y químicos. Los procesos químicos podrían estar asociados con la presencia de fluidos hidrotermales cerca del Delta del Río Colorado (i.e., central hidrotérmica Cerro Prieto) que generan cuarzo con cavidades de disolución y grabado y precipitación de sílice (fig. 4). Esta interpretación es sustentada por granos de cuarzo químicamente alterados sujetos a una acción hidrotermal artificial con cloruro de sodio durante 247 h (Krinsley y Donahue 1968).

A fin de observar cualquier cambio en la forma y/o posición de los LLC estimados en el diagrama ternario en relación con las muestras y los vértices A, B y C, se desearon las muestras C4c, P1c y P5f debido a su tendencia inesperada en la gráfica (fig. 2b). La eliminación de estas muestras provoca un desplazamiento de los LLC hacia el vértice B simplemente porque las muestras restantes son mejores estimadores de la localización de la media situada en el área de dominancia de los rasgos superficiales de origen mecánico (fig. 2b).

De esta discusión se puede afirmar que los ambientes de alta energía como la cuenca del Río Colorado y fuentes graníticas, han aportado cuarzo que ha estado expuesto a colisiones hidráulicas (fluviales). No obstante, también se observaron

sources near El Pinacate dune fields. Some samples (P6c) show upturned plates that could be the result of wind action (Al-Hurban and Gharib 2004) (fig. 4); however, most of the quartz inherits its morphology from high-energy fluvial environments.

Samples C4c, P1c and P5f tend towards pole C (fig. 2a), which suggests that quartz from these sites has been subjected to a mix of mechanical and chemical processes. Chemical processes might be associated with the presence of hydrothermal fluids near the Colorado River Delta (i.e., Cerro Prieto Hydrothermal Field) that generate quartz with solution pits and etching and silica precipitation (fig. 4). This interpretation is supported by chemically-altered quartz grains subjected to artificial hydrothermal action with sodium chloride for 247 h (Krinsley and Donahue 1968).

In order to observe any change in the shape and/or position of the estimated LCNRB in the ternary diagram in relation to the samples and poles A, B and C, samples C4c, P1c and P5f were removed because of their unexpected trend in the plot (fig. 2b). Removal of these samples causes a shift of the LCNRB towards pole B simply because the remaining samples are better estimators of the location of the mean situated in the area of dominance of mechanical surface textures (fig. 2b).

From the preceding discussion it can be said that high-energy environments like the Colorado River basin and granitic sources have provided quartz that has experienced hydraulic (fluvial) collisions. However, there are also quartz

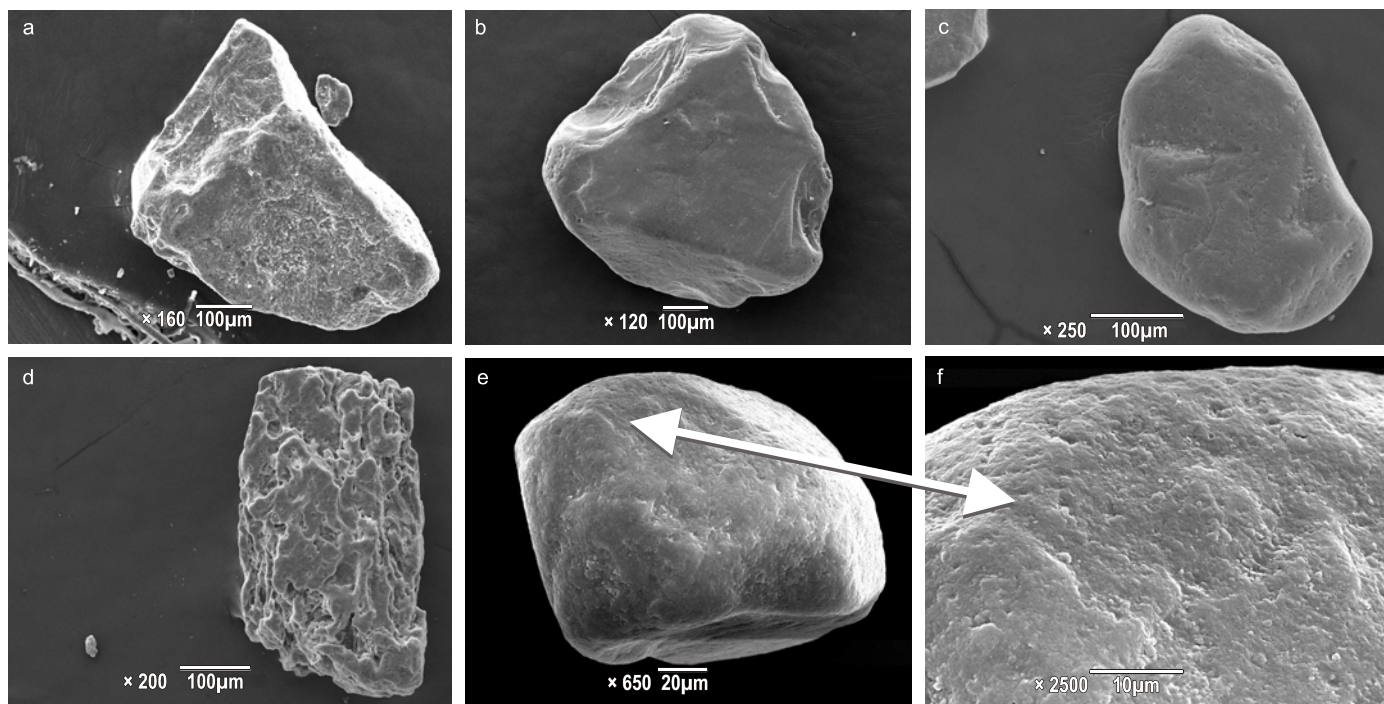


Figura 4. Arena de dunas desérticas mostrando cuarzo con: (a) fracturas concoidales, muestra C5f; (b) fracturas concoidales con bordes lisos, C5f; (c) estrías lineales o curvas lisas y pulidas, P8f; (d) precipitación de sílice, P8f; (e y f) placas invertidas con magnificación, P6c. La flecha indica el área de magnificación.
Figure 4. Desert dune sand showing quartz with: (a) conchoidal fractures, sample C5f; (b) conchoidal fractures with smooth edges, C5f; (c) smooth and polished linear and curved grooves, P8f; (d) silica precipitation, P8f; and (e and f) upturned plates with magnification, P6c. The arrow indicates the area of magnification.

granos de cuarzo con rasgos superficiales de origen químico posiblemente vinculados a la actividad hidrotermal cerca del área de San Luis Río Colorado. Además, la mayoría de los granos de cuarzo de las dunas desérticas podrían haber adquirido sus texturas superficiales de un primer ciclo de transporte y depositación que no refleja de manera precisa los mecanismos eólicos que afectan las dunas de arena, probablemente por su cercanía a la roca fuente y poco desgaste superficial.

Texturas del cuarzo de dunas costeras

Las gráficas de la media y de dispersión hacia el vértice B para el cuarzo de las dunas costeras sugieren que la mayoría de los granos observados en las muestras G4c, G3f, G6c, Pe1c, Pe2f, Pe3c y Pe6f (fig. 2a, tabla 2) estuvieron expuestas a alteración química probablemente asociada con su cercanía al agua de mar. Los rasgos de origen químico de los granos de cuarzo de las dunas costeras posiblemente son producidos por ambientes sobresaturados en sílice de zonas intermareales y por abrasión química de granos de cuarzo de ambientes húmedos (Le Ribault 1975, Higgs 1979, Pye y Mazzullo 1994, Moral-Cardona *et al.* 1997) (fig. 5). Para este estudio, sólo el primer mecanismo podría generar rasgos químicos asociados con la morfología del cuarzo. Esta interpretación es apoyada por los vientos dominantes que soplan hacia la costa del

grains showing chemical surface textures that might be the result of hydrothermal activity near the San Luis Río Colorado area. Furthermore, the majority of the quartz grains from the desert dunes may have inherited their surface textures from a first cycle of transport and deposition that does not reflect accurately the aeolian mechanisms influencing the sand dunes, probably because of the closeness of the source rocks and little aeolian abrasion.

Quartz textures from coastal dunes

The mean and scatter plots towards the B pole for the coastal dune quartz suggest that most of the grains observed in samples G4c, G3f, G6c, Pe1c, Pe2f, Pe3c, and Pe6f (fig. 2a, table 2) were subjected to chemical alteration probably associated with the closeness of the quartz grains to the seawater. Chemical features in quartz grains from the coastal dunes are likely to be produced by silica-saturated environments of intertidal zones and chemical abrasion of quartz grains in humid environments (Le Ribault 1975, Higgs 1979, Pye and Mazzullo 1994, Moral-Cardona *et al.* 1997) (fig. 5). For this study, only the first mechanism might produce chemical features associated with the quartz morphology. This interpretation is supported by the dominant onshore southwesterly winds that occur up to 60% of the time in one month, transporting beach

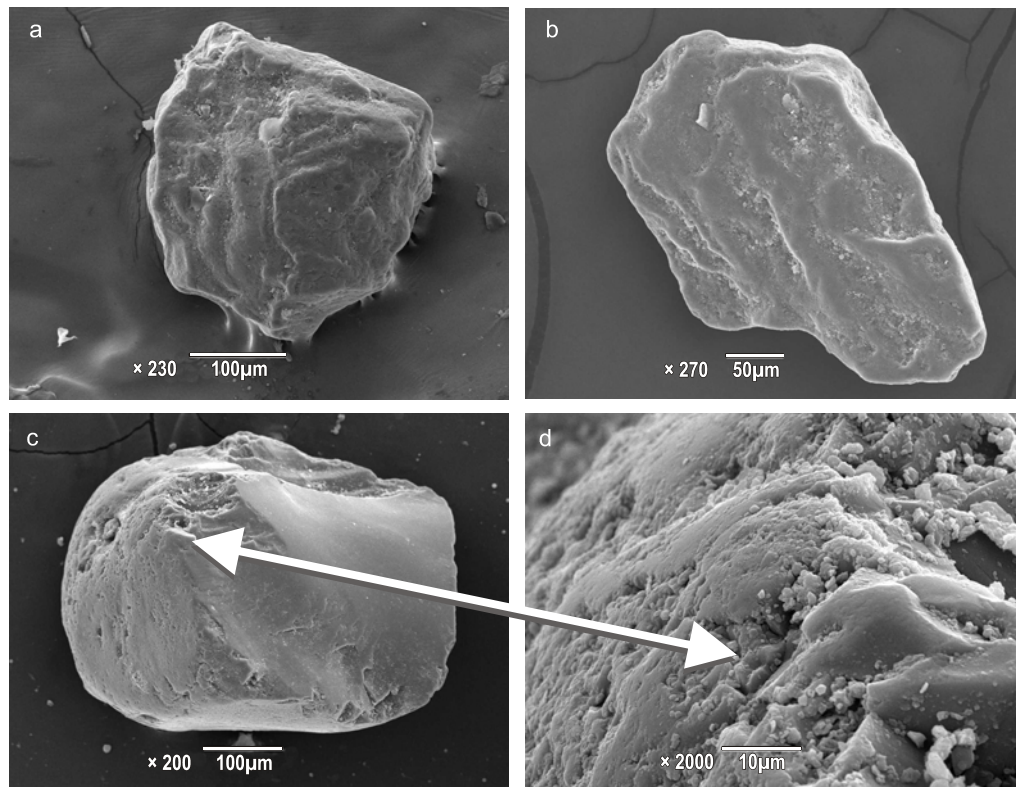


Figura 5. Arena de dunas costeras mostrando cuarzo con precipitación de sílice, muestras G4c (a) y Pe1c (b), y cavidades de disolución y grabado con magnificación de la muestra Pe2f (c y d).

Figure 5. Coastal dune sand showing quartz with silica precipitation, samples G4c (a) and Pe1c (b), and solution pits and etching with magnification of sample Pe2f (c and d).

suroeste hasta 60% del tiempo durante un mes, transportando arena de playa hacia las dunas, y por la presencia de restos de concha en las dunas costeras, lo cual indica una fuente de arena de playa que controla la composición de las arenas de las dunas costeras especialmente en Puerto Peñasco (Kasper-Zubillaga *et al.* 2006)

Pye y Mazzullo (1994) indicaron que la mayoría del cuarzo en dunas controladas por clima tropical ha estado sujeto a una precipitación secundaria y disolución de sílice. En nuestro estudio, el clima actual no parece jugar un papel en la disolución y precipitación de sílice en los granos de cuarzo de las dunas costeras. Esto se hace evidente por los bajos valores del índice químico de alteración, $CIA = (Al_2O_3/Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O) \times 100$ (Nesbitt y Young 1996), para las dunas costeras que van de 48.6 a 54.7 (Kasper-Zubillaga *et al.* 2006). En contraste, en otras regiones costeras como Australia y Nueva Zelanda, los granos de cuarzo de dunas muestran rasgos superficiales de origen químico, tales como cavidades de disolución, grabado y hasta precipitación de sílice en forma de diatomeas debido a la gran humedad y tasas de precipitación y a las zonas intermareales saturadas en sílice (Pye y Mazzullo 1994, Kasper-Zubillaga *et al.* 2005). Asimismo, la sobresaturación en sílice podría ser consecuencia de la precipitación de sílice durante periodos de la caída de polvo con lluvia en áreas con una precipitación relativamente alta (Whalley *et al.* 1987).

Se eliminaron las muestras G1f y G2c de las gráficas debido a su tendencia inesperada en el diagrama ternario. Esto resultó en una dispersión de los LLC hacia los vértices B y C, ya que las muestras restantes son mejores estimadores de la localización de la media (fig. 2b).

El cuarzo de las dunas costeras posee más rasgos de origen químico que de origen mecánico asociados con agua de mar. Estos granos de cuarzo podrían haber derivado de ambientes saturados en sílice de las zonas intermareales y haber estado expuestos a abrasión química, y reflejan de manera más precisa la influencia del agua en las características de las texturas superficiales.

Análisis estadístico para todo el conjunto de datos

En el análisis factorial (modo R), el factor 1 indica que las superficies lisas están vinculadas al tamaño medio de los granos de cuarzo. Esto sugiere que los granos de cuarzo gruesos son más susceptibles a desgaste y rompimiento que los finos. Cuando el cuarzo ha sido reducido a tamaños más finos mantiene las superficies lisas generadas durante el transporte eólico. Esta observación es sustentada por el experimento de desgaste eólico de Whalley *et al.* (1987), en el cual se reduce el tamaño de granos de cuarzo después de varias horas de agitación en un tubo de ensayo mediante un flujo constante de aire. En este experimento se reducen substancialmente los tamaños del cuarzo, hasta granos de tamaño limo después de 48 h de fricción mecánica. Además, algunos granos de cuarzo muestran superficies lisas después de haber sido reducidos (Whalley *et al.* 1987). Es probable que el tamaño de los granos de cuarzo

sands into the dunes, and by the presence of shell debris in the coastal dunes, indicating a beach-sand source that controls the composition of the coastal dune sands especially in the Puerto Peñasco site (Kasper-Zubillaga *et al.* 2006)

Pye and Mazzullo (1994) reported that most of the quartz in dunes controlled by tropical weather has been subjected to secondary silica precipitation and silica dissolution. In our study, modern weather does not seem to play a role in the dissolution and precipitation of silica in the quartz grains from the coastal dune sands. This is evidenced by the low chemical index of alteration values ($CIA = (Al_2O_3/Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O) \times 100$) (Nesbitt and Young 1996) for the coastal dune sands that range from 48.6 to 54.7 (Kasper-Zubillaga *et al.* 2006). In contrast, in some other coastal areas like Australia and New Zealand, quartz grains in dune sands display chemical surface textures, such as solution pits, etching and even silica precipitation in the form of diatoms, due to high humidity and rainfall rates, and intertidal zones saturated with silica (Pye and Mazzullo 1994, Kasper-Zubillaga *et al.* 2005). Also, silica overgrowth might be a consequence of silica precipitation during periods of dust fall with rain in areas with relatively high precipitation (Whalley *et al.* 1987).

Samples G1f and G2c were removed from the plots because of their unexpected trend in the ternary diagram. Removal of these samples causes a dispersal of the LCNRB towards poles B and C because the remaining samples are better estimators of the location of the mean (fig. 2b).

Quartz from the coastal dunes displays more chemical features than mechanical features associated with marine water. These quartz grains may have derived from silica-saturated environments of intertidal zones and been subjected to chemical abrasion. They reflect more accurately the influence of the water in the characteristics of the surface textures.

Statistical analysis for the whole data set

In the R-mode factor analysis, factor 1 indicates that smooth surfaces are linked to the mean quartz grain size. This suggests that coarse quartz grains are more likely to experience breakage and abrasion than fine quartz grains. Once the quartz is reduced to finer sizes it retains the smooth surfaces produced during aeolian transport. This observation is supported by the aeolian attrition experiment by Whalley *et al.* (1987), in which medium-size quartz grains are reduced in size after several hours of being agitated in a test tube by a constant stream of air. In this experiment, quartz sizes are reduced substantially even to silt-sized grains after 48 h of mechanical attrition. Moreover, some quartz grains show smooth surfaces after being reduced (Whalley *et al.* 1987). It is likely that quartz grains from the Altar Desert have been reduced in grain size after fluvial and wind transport, which also produces smooth surface textures.

Factor 2 suggests that linear and curved grooves and conchoidal fractures are inversely correlated due to the negative

del Desierto de Altar se haya reducido después de un transporte fluvial y eólico, el cual también produce texturas superficiales lisas.

El factor 2 sugiere que las estrías lineales o curvas y las fracturas concoidales están inversamente correlacionadas debido a su signo de carga negativo y a que su presencia o ausencia es dominada por la energía impartida a los granos.

Agradecimientos

Este estudio forma parte del proyecto 139156-T de CONACYT (México). Agradecemos a Y Hornelas-Orozco (Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM) los análisis al microscopio electrónico de barrido.

Traducido al español por Christine Harris.

Referencias

- Al-Hurban A, Gharib I. 2004. Geomorphological and sedimentological characteristics of coastal and inland sabkhas, southern Kuwait. *J. Arid Environ.* 58: 59–85.
- Blount G, Lancaster N. 1990. Development of the Gran Desierto sand sea. *Geology* 18: 724–728.
- Carriquiry JD, Sánchez A, Camacho-Ibar VF. 2001. Sedimentation in the northern Gulf of California after cessation of the Colorado River discharge. *Sediment. Geol.* 144: 37–62.
- Cupul LA. 1994. Flujos de sedimentos en suspensión y nutrientes en la cuenca estuarina del Río Colorado, Ensenada, BC, Mexico. Tesis de maestría, Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California, México, 117 pp.
- Fernández-Eguiarte A, Gallegos-García A, Zavala-Hidalgo J. 1990a. Oceanografía Física 1 (Masas de Agua y Mareas de los Mares Mexicanos). Atlas Nacional de México (IV.9.1 Verano). Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Fernández-Eguiarte A, Gallegos-García A, Zavala-Hidalgo J. 1990b. Oceanografía Física 1 (Masas de Agua y Mareas de los Mares Mexicanos). Atlas Nacional de México (IV.9.2 Invierno). Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Fryberger SG, Dean G. 1979. Dune forms and wind regime. In: McKee ED (ed.), *A Study of Global Sand Seas*. US Geological Survey Professional Paper, Washington DC, pp. 137–169.
- Gutiérrez-Mas JM, Moral JP, Sánchez A, Domínguez S, Muñoz-Pérez JJ. 2003. Multicycle sediments on the continental shelf of Cadiz (SW Spain). *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 57: 667–677.
- Higgs R. 1979. Quartz-grain surface features of Mesozoic-Cenozoic sands from the Labrador and western Greenland continental margins. *J. Sediment. Petrol.* 49: 599–610.
- 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.
- Kasper-Zubillaga JJ, Carranza-Edwards A. 2005. Grain size discrimination between sands of desert and coastal dunes from northwestern Mexico. *Rev. Mex. Cienc. Geol.* 22: 383–390.
- Kasper-Zubillaga JJ, Dickinson WW, Carranza-Edwards A, Hornelas-Orozco Y. 2005. Petrography of quartz grains in beach and dune sands of Northland, North Island, New Zealand. *N.Z. J. Geol. Geophys.* 48: 649–660.
- Kasper-Zubillaga JJ, Zolezzi-Ruiz H, Carranza-Edwards A, Girón-García P, Ortiz-Zamora G, Palma M. 2006. Sedimentological, modal analysis, and geochemical studies of desert and coastal dunes, Altar Desert, NW Mexico. *Earth Surf. Process. Landforms* (in press).
- Krinsley D, Donahue J. 1968. Environmental interpretation of sand grain surface textures by electron microscopy. *Geol. Soc. Am. Bull.* 79: 743–748.
- Krinsley D, Margolis S. 1969. Scanning electron microscopy: A new method for studying sand grain surface textures. *Trans. New York Acad. Sci.* 31: 457–477.
- Lancaster N. 1989. The dynamics of star dunes: an example from The Gran Desierto. *Sedimentology* 36: 273–289.
- Le Ribault L. 1975. L'exoscopie, méthode et applications. *Notes Memoires CFP* 12: 231 pp.
- Margolis SV, Kennet JP. 1971. Cenozoic paleoglacial history of Antarctica recorded in subantarctic deep-sea cores. *Am. J. Sci.* 271: 1–36.
- Margolis SV, Krinsley DH. 1974. Process of formation and environmental occurrence of microfeatures on detrital quartz grains. *Am. J. Sci.* 271: 449–464.
- Mazzullo J, Sims D, Cunningham D. 1986. The effects of eolian sorting and abrasion upon the shapes of fine quartz sand grains. *J. Sediment. Petrol.* 56: 45–56.
- Merriam R. 1969. Source of sand dunes of southeastern California and northwestern Sonora, Mexico. *Bull. Geol. Soc. Am.* 80: 531–534.
- Middleton GV, Davis PM. 1979. Surface textures and rounding of quartz sand grains on intertidal sand bars, Bay of Fundy, Nova Scotia. *Can. J. Earth Sci.* 16: 2071–2085.
- Moral-Cardona JP, Gutiérrez-Mas JM, Sánchez-Bellón A, López-Aguayo F, Caballero MA. 1997. Provenance of multicycle quartz arenites of Pliocene age at Arcos, southwestern Spain. *Sediment. Geol.* 112: 251–261.
- Moral-Cardona JP, Gutiérrez-Mas JM, Sánchez-Bellón A, Domínguez-Bella S, Martínez-López J. 2005. Surface textures of heavy-mineral grains: A new contribution to provenance studies. *Sediment. Geol.* 174: 223–235.
- Muhs DR, Reynolds RL, Been J, Skipp G. 2003. Eolian sand transport pathways in the southwestern United States: Importance of the Colorado River and local sources. *Quatern. Int.* 104 3–18.
- Nesbitt HW, Young GM. 1996. Petrogenesis of sediments in the absence of chemical weathering: Effects of abrasion and sorting on bulk composition and mineralogy. *Sedimentology* 43: 341–356.
- Pérez-Villegas G. 1990. Vientos Dominantes. Atlas Nacional de México (Hoja IV.4.2). Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Pye K, Mazzullo J. 1994. Effects of tropical weathering on quartz shape: An example from northeastern Australia. *J. Sediment. Res.* A64: 500–507.
- Robinson RS, Johnsson MJ. 1997. Chemical and physical weathering of fluvial sands in an Arctic environment: Sands of the Sagavanirktok River, North Slope, Alaska. *J. Sediment. Res.* 67: 560–570.

Acknowledgements

This study is part of CONACYT project 139156-T (Mexico). We are indebted to Y Hornelas-Orozco (Institute of Marine Sciences and Limnology, UNAM) for the SEM analysis.

- Schofield JC. 1970. Coastal sands of Northland and Auckland. N.Z. J. Geol. Geophys. 13: 767–824.
- Stensrud DJ, Gall RL, Nordquist MK. 1997. Surges over the Gulf of California during the Mexican monsoon. *Monsoon Weather Rev.* 125: 417–437.
- Swan ARH, Sandilands M. 1995. *Introduction to Geological Data Analysis*. Blackwell Science, Oxford, 446 pp.
- Thompson RW. 1968. Tidal flat sedimentation on the Colorado River Delta, northwestern Gulf of California. *Bull. Geol. Soc. Am. Mem.* 107.
- Voudoris KS, Lambrakis NJ, Papatheothorou G, Daskalaki P. 1997. An application of factor analysis for the study of the hydro-geological conditions in Plio-Pleistocene aquifers of NW Achaia (NW Peloponnesus, Greece). *Math. Geol.* 29: 43–59.
- Whalley WB, Smith BJ, McAlister JJ, Edwards AJ. 1987. Aeolian abrasion of quartz particles and the production of silt-size fragments: Preliminary results. In: Frostick L, Reis I (eds.), *Desert Sediments: Ancient and Modern*. Geol. Soc. Spec. Publ. pp. 129–138.
- Weltje GJ. 2002. Quantitative analysis of detrital modes: Statistically rigorous confidence regions in ternary diagrams and their use in sedimentary petrology. *Earth Sci. Rev.* 57: 211–253.

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