



## **Análisis de proveniencia de las arenas del complejo de dunas parabólicas El Socorro, Baja California, México, mediante una caracterización mineralógica y granulométrica**

Natalia Rodríguez Revelo<sup>1</sup>, Gabriel Rendón Márquez<sup>2</sup>, Ileana Espejel<sup>1,\*</sup>, Oscar Jiménez Orocio<sup>1</sup>,  
María Luisa Martínez Vázquez<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Facultad de Ciencias, carretera Tijuana- Ensenada, km103, C. P.22860, Ensenada, Baja California, México.

<sup>2</sup> Centro de Investigación Científica y de Educación Superior Ensenada (CICESE), Departamento de Geología, carretera Ensenada-Tijuana No. 3918, Zona Playitas, C. P. 22860, Ensenada, Baja California, México.

<sup>3</sup> Red de Ecología Funcional, Instituto de Ecología A.C., Carretera Antigua a Coatepec 351, El Haya, Xalapa C. P. 91070, Veracruz, México.

\* ileana.espejel@uabc.edu.mx

### **Resumen**

En este estudio se analizó la granulometría y se realizó la caracterización mineralógica del sedimento arenoso de 14 muestras superficiales y 15 muestras de núcleos de 2 a 30 m de profundidad de la duna costera El Socorro (DCES), San Quintín, Baja California, México. Para analizar la proveniencia se colectaron 12 muestras en tres arroyos y en barreras arenosas aledañas. La DCES se compone principalmente de cuarzo y plagioclasas: el cuarzo monocristalino constituye de 50 % a 56 % de las muestras de núcleos, mientras que de 38 % a 60 % se encontró en las muestras superficiales; por otro lado, las plagioclasas componen de 35 % a 39 % de las muestras de núcleos, y 36 % a 58 % en las muestras superficiales.

El resto de la composición son cantidades menores de fragmentos líticos, abundantes minerales densos (principalmente hornblenda), trazas de piroxeno y escasos minerales de hierro como magnetita e ilmenita (> 1 % en volumen). Las muestras de los arroyos El Socorro, localizado al sur de la DCES, y Santo Domingo, ~45 km al norte de la DCES, están compuestos de 69 % y 52 % de cuarzo monocristalino, respectivamente; el arroyo San Simón, localizado al norte de la DCES, incluye 63 % de plagioclasas. La caracterización mineralógica de la zona de estudio y el análisis modal sugiere que la fuente principal de sedimento de la DCES, es el arroyo Santo Domingo.

Palabras clave: duna costera, mineralogía, granulometría, proveniencia, arroyo Santo Domingo, San Quintín, Baja California.

### **Abstract**

*In this study, fourteen superficial sandy sediment samples and fifteen core samples, taken at 2 to 30 m in depth, were analyzed in order to determine the granulometry and mineralogical features of the dune system named duna costera El Socorro (DCES), San Quintín, Baja California, Mexico. In addition, we investigated the sediment provenance by analyzing twelve samples collected from three nearby arroyos and sand bars. The main components of the DCES are plagioclase and quartz (35 - 39 % and 36 - 58 % plagioclase, and 50 - 56 % and 38 - 60 % monocrystalline quartz for core samples and superficial samples, respectively). The remaining components include scarce lithic fragments and abundant heavy minerals, mostly hornblende and traces of pyroxene, but also small amounts of magnetite and ilmenite (> 1 % in volume). The samples from arroyo El Socorro (south of the DCES) and arroyo Santo Domingo (~45 km north of the DCES) contain 69 and 52 % monocrystalline quartz, respectively, while arroyo San Simon, located north of the DCES,*

has 63 % plagioclase. Mineralogical characterization in the study area and modal analysis suggest that the main DCES sediment source is the arroyo Santo Domingo.

*Keywords:* coastal sand dune, mineralogy, granulometry, provenance, arroyo Santo Domingo, San Quintín, Baja California.

## 1. Introducción

Las playas y las dunas costeras se consideran entre los ambientes sedimentarios más importantes del mundo, debido a que son reconocidos como ecosistemas extremadamente dinámicos (Moreno-Casasola *et al.*, 2006). Estos rasgos se forman gracias a la erosión de diferentes tipos de rocas, siendo el producto de la erosión una enorme variedad de arena. La arena de las dunas está formada predominantemente de minerales como el cuarzo, calcita y cantidades menores de fragmentos calcáreos de conchas. Las arenas feldespáticas son muy comunes, especialmente aquellas con una apreciable mezcla de fragmentos de roca. Las arenas de cuarzo forman el 80 % o más del material de silicatos detríticos (Williams *et al.*, 1968; Carranza-Edwards *et al.*, 1998). La composición sedimentológica y textural, y las variaciones geoquímicas están sujetas a diversos acontecimientos meteorológicos como tormentas y huracanes que se presentan a lo largo de la costa (Kasper-Zubillaga y Carranza-Edwards, 2005).

Las dunas costeras son importantes ecosistemas, ya que funcionan como refugio para diferentes tipos de fauna residente y migratoria. Estos rasgos geomorfológicos incluyen ambientes en condiciones de fuerte aridez hasta ambientes acuáticos, tanto temporales como permanentes, por lo que proveen hábitats especializados para un elevado número de plantas y animales. Además, constituyen una fuente importante de material arenoso para múltiples usos, y protegen las tierras interiores de la erosión provocada por las tormentas y el incremento potencial del nivel del mar (Moreno-Casasola *et al.*, 2006).

Los minerales de la arena proveniente de las dunas costeras están cobrando importancia en el sector minero pues el cuarzo y algunos minerales ferruginosos tienen valor comercial. El aprovechamiento de estos recursos ocurre en varias partes del mundo. Por ejemplo, en Turquía se extrae carbón mineral, cobre, hierro y cromo (Van der Maarel, 1993) y en otras localidades de África, Sudamérica y Norteamérica se extrae titanio y carbonato de calcio (Carter, 1991). En la zona de KwaZulu-Natal, al noreste de Sudáfrica, se extraen minerales pesados de la arena de las dunas como el circón, la ilmenita y el rutilo (Van Aarde, 2004). En las playas guatemaltecas existe una gran cantidad de hierro, entre el 28 y el 33 %; y las arenas de la costa del océano Pacífico contienen un 3 % titanio (Oliva, 2010).

Rosales-Hoz *et al.* (1988) mencionan que los sedimentos analizados en el litoral del estado de Sonora contienen altas concentraciones de hierro, el cual alcanza hasta

42.66 %, el titanio llega al 4.68 %, y el estaño 0.47 %. En el presente trabajo se planteó como objetivo la caracterización de la composición mineralógica y granulométrica, la determinación de la proveniencia y los procesos que dieron origen al material sedimentario de la duna costera El Socorro (DCES), localizada en San Quintín, Baja California.

## 2. Área de estudio

La DCES se localiza en el ejido Nueva Odisea, Baja California, a 200 km al sur de la ciudad de Ensenada, entre los 30° 20' 53" N y los 115° 49' 4" W, a una altitud en la cima de 125 msnm. Colinda al oeste con la bahía Santa María, al sureste con el arroyo El Socorro y al este con los altos topográficos de la cordillera peninsular (SEGOB, 2007) (Figura 1). La superficie aproximada de la DCES es de 1104 ha, predomina el sedimento fino arenoso con tonalidades *beige* (código de RGB F5F5DC) en las laderas, y *beige* más claro (código de RGB FDF5E6) en la cima. También se observan lentes de minerales oscuros.

La geología de la planicie donde está ubicado el ejido Nueva Odisea, está formada por conglomerados del Cenozoico y aluviones del Cuaternario, con importante aporte sedimentario de las rocas batolíticas del Cretácico y pre-batolíticas del Jurásico de los arroyos que rodean la zona de estudio. Los sedimentos de la DCES descansan sobre secuencias sedimentarias del Cuaternario de origen marino (Gastil *et al.*, 1975).

Daesslé *et al.* (2009) mencionan que los minerales dominantes en los sedimentos superficiales de la laguna costera de San Quintín (LCSQ) son principalmente cuarzo monocristalino y plagioclasas, cuya fuente proviene tanto del escurrimiento de los arroyos Santo Domingo y San Simón, así como de los volcanes que rodean la bahía.

Este sistema se caracteriza por la presencia de dunas parabólicas con alturas de hasta 20 m, y que se encuentran imbricadas y alargadas perpendicularmente a lo largo de la línea de costa. Existen dunas tanto móviles como estabilizadas con vegetación secundaria. El tipo de vegetación que se encuentra sobre las dunas de San Quintín ha sido descrito recientemente por Vanderplank (2011) y la define como de matorral costero suculento dominado por especies de plantas nativas de la provincia florística Californiana. Peinado *et al.* (2005) mencionan que esta flora nativa está formada principalmente por la asociación de *Ephedra californica* y *Lycium brevipes*. La DCES es una zona especialmente diversa en especies de plantas que

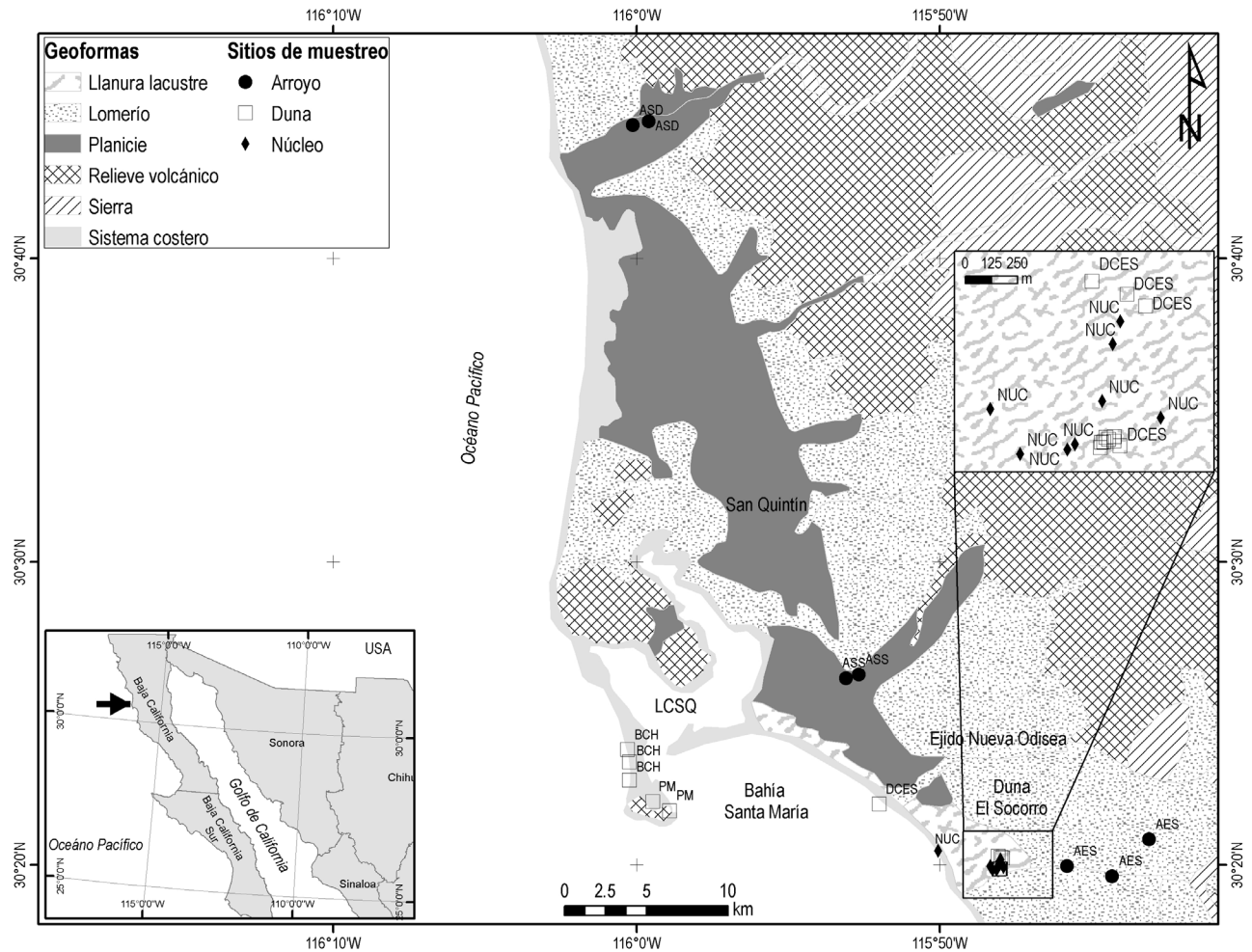


Figura 1. Localización y tipos de geoformas del área de estudio. AES, arroyo El Socorro; ADS, arroyo Santo Domingo; ASS, arroyo San Simón; BCH, barra La Chorera; DCES, duna costera El Socorro; NUC, núcleos y PM, Punta Mazo. (duna El Socorro, ejido Nueva Odisea, San Quintín, Baja California).

representan cerca del 63 % de la flora colectada en todo el estado de Baja California (Espejel *et al.*, 2013).

### 3. Métodos

Se colectaron 14 muestras superficiales, todas con una distancia mínima de 50 m entre ellas, a 30 cm de profundidad: tres en la parte móvil de la DCES y once en la ladera suroeste adyacente a un banco de material con evidencias de explotación reciente, donde la duna está estabilizada (Figura 1).

También se tomaron muestras de los arroyos ubicados al sur y al norte de la DCES (El Socorro, San Simón y Santo Domingo), en la barrera arenosa La Chorera, así como en Punta Mazo, adyacente a la bahía de San Quintín, con la finalidad de explorar las posibles fuentes de arena de la DCES. Se obtuvieron cinco núcleos mediante perforación en la ladera suroeste de la DCES con profundidades de 2 a 30 m. Las muestras de éstos fueron proporcionadas por el Ing. Jorge Díaz y fueron parte de una prospección minera

(Figura 1). En la zona de los arroyos se colectaron tres muestras de cada sitio y en Punta Mazo sólo se obtuvieron dos muestras de duna debido al difícil acceso. Con este muestreo se pudo cubrir gran parte de la duna y de las zonas aledañas a la misma (Tabla 1).

El procedimiento de perforación y muestreo de los núcleos se realizó con una máquina perforadora *Mobile Drill B-85* adecuada con horadores huecos para facilitar el muestreo a la profundidad requerida. El muestreo se efectuó con un muestreador de caña partida.

Se incluyeron los resultados del análisis modal de cinco muestras de sedimento de la laguna costera de San Quintín (LCSQ), Baja California, reportados por Daesslé *et al.* (2009), para determinar si la composición mineralógica que identificaron en la LCSQ es semejante a la encontrada en la DCES.

Las muestras se secaron en un horno a 60 °C durante 12 h y se cuartearon para homogeneizarlas. De cada muestra a procesar, se obtuvieron cuatro sub-muestras, de las cuales sólo se utilizaron dos, una para petrografía y otra para el análisis granulométrico. Ambas sub-muestras

Tabla 1. Sitios de muestreo y número de muestras por cada una de las zonas estudiadas.

Sitios	No. Muestras	Superficiales	Núcleos (2-30 m profundidad)	No. Sub-muestras utilizadas
Duna Costera El Socorro (DCES)	28	14	14	58
Arroyo El Socorro (AES)	3	3		6
Arroyo San Simón (ASS)	3	3		6
Arroyo Santo Domingo (ASD)	3	3		6
Barrera La Chorera (BCH)	3	3		6
Punta Mazo (PM)	2	2		4

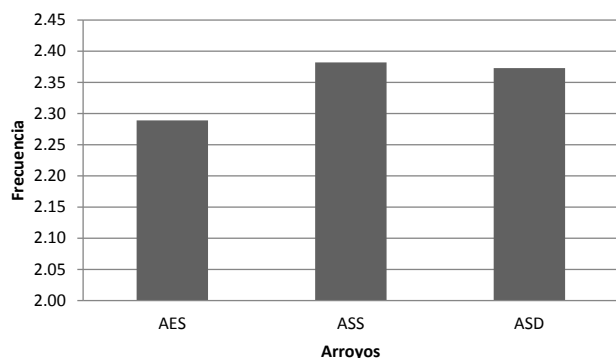


Figura 2. Histograma de frecuencias del arroyo El Socorro (AES), arroyo San Simón (ASS) y arroyo Santo Domingo (ASD).

fueron tratadas con ácido clorhídrico para determinar presencia de carbonatos y con peróxido de hidrógeno para eliminar materia orgánica (Day, 1965). Para determinar el porcentaje de arenas, limos y arcillas, las sub-muestras se trataron por el método de tamices descrito en Rendón (1995) y clasificado por el método de Wentworth (1922). Los parámetros estadísticos y texturales se obtuvieron con el programa SysGran v. 3.0, basado en Folk y Ward (1957). Se efectuó un análisis de componentes principales (ACP) (Davis, 1986) de los parámetros texturales.

Las sub-muestras para petrografía se disgregaron con hexametáfosfato de sodio (Ahmad y Prashad, 1970) para eliminar limos y arcillas que no son útiles para el análisis modal (León, 2001). Posteriormente, las muestras secas se impregnaron con resina epóxica, se elaboraron láminas delgadas y se tiñeron para diferenciar entre cuarzo, feldespatos potásicos y feldespatos plagioclasas por el método descrito en Rendón (1995). Para el análisis de proveniencia se contaron trescientos puntos en cada sección delgada según el método de Gazzi-Dickinson (Ingersoll et al., 1984), usando un contador automático de puntos Pelcon en un microscopio de luz polarizada transmitida.

## 4. Resultados

### 4.1. Parámetros texturales

El análisis granulométrico indica que los sedimentos de la DCES son muy homogéneos y se clasifican como

arenas finas, con una media de tamaño de grano de 2.14 a 2.86 mm (Tabla 2), y fluctúan entre muy bien seleccionadas y moderadamente seleccionadas. La asimetría varía de aproximadamente simétrica a positiva y la curtosis va de mesocúrtica a muy leptocúrtica, sin embargo la mayoría de las muestras son leptocúrticas.

Los sedimentos del arroyo El Socorro (AES) se componen de arenas gruesas, moderadamente seleccionadas y con asimetría positiva a moderadamente positiva y curtosis platicúrtica, mientras que las muestras del arroyo San Simón (ASS) son arenas medias a finas, moderadamente seleccionadas y con asimetría aproximadamente simétrica y curtosis mesocúrtica. En el arroyo Santo Domingo (ASD) gradúan de arenas medias a gruesas, de moderada a pobremente seleccionadas con una asimetría que va de positiva a aproximadamente simétrica y la curtosis de mesocúrtica a platicúrtica.

Las muestras de núcleos son muy homogéneas y gradúan de la superficie hacia la base, de arenas finas moderadamente seleccionadas a arenas medias muy bien seleccionadas. La asimetría tiende a ser muy negativa a mayor profundidad y aproximadamente simétrica en la superficie.

### 4.2. Mineralogía de sedimentos

Los sedimentos de la DCES están compuestos principalmente de cuarzo, feldespato potásico, plagioclasas y cantidades menores de fragmentos líticos, así como un importante contenido de minerales pesados, de los cuales el más abundante es la hornblenda. También se observaron trazas de piroxeno y en menor cantidad (1 a 2 %) de magnetita e ilmenita.

Las arenas de la DCES se clasifican como arenas feldespáticas, según Okada (1971), con una mayor abundancia relativa de plagioclasas que de feldespato potásico. Las muestras superficiales colectadas en la DCES (Figura 5a), presentaron mayor abundancia de feldespato total con 52 a 60 %, mientras que el contenido de cuarzo total es de 34 a 39 % (Tabla 3). En la ladera de la duna, el contenido de feldespato total es de 35 a 46 % y el cuarzo total va del 54 a 45 %. En todas las muestras de la DCES se puede observar un bajo contenido de fragmentos líticos totales.

Los sedimentos del arroyo El Socorro localizado justo al sur de la duna, presentaron el 22 % de feldespato y 55 %

de cuarzo, mientras que el arroyo San Simón que drena en la LCSQ tuvo bajo contenido de cuarzo con 33 % y alto contenido de feldespatos totales, con más del 60 %. En el arroyo Santo Domingo, el más alejado de la DCES, indica casi la misma proporción de feldespato total y de cuarzo total con 46 y 50 % respectivamente. El contenido de fragmentos líticos totales es notablemente más alto en el arroyo El Socorro que en los otros dos arroyos, donde el contenido de líticos totales no alcanza el 10 % de abundancia (Tabla 3).

#### 4.3. Análisis Estadísticos

##### 4.3.1. Parámetros texturales

El análisis de componentes principales indicó que los ejes 1 y 2 explicaron el 74.87 % de la variabilidad total de los parámetros texturales de los sedimentos (Tabla 2). La

selección está dada por el eje 1 y el tamaño medio del grano y la asimetría por el eje 2 (Figura 3). Estos ejes indican que los parámetros granulométricos están relacionados con el tamaño medio del grano y con la asimetría, ya que estos sedimentos son clasificados como arenas finas.

El análisis de varianza de un factor indicó que la diferencia entre grupos no es estadísticamente significativa entre los tres arroyos analizados (Figura 2), a pesar de sus parámetros texturales, presentando una probabilidad de 0.99 con un valor crítico F de 3.10 ( $\alpha$  0.05) con un valor de grados libertad de 3.87.

Las muestras de Punta Mazo y la barrera arenosa La Chorera son muy similares (valor crítico F = 3.47), se componen de arenas finas que van de bien a muy bien seleccionadas con asimetrías negativas a muy positivas y curtosis leptocúrtica, muy similares a las muestras superficiales de la DCES.

Tabla 2. Parámetros texturales en unidades phi de los sedimentos de las muestra de la duna El Socorro, Ensenada, Baja California, México.

Muestra	Tipo de muestra	Tamaño medio de grano (mm)	Selección	Asimetría	Desviación
1	DCES	0.9054	0.8896	-0.03845	0.5404287
2	DCES	0.6592	0.8018	0.05136	0.3985316
3	DCES	0.5086	0.8055	0.2901	0.2586919
4	DCES	2.154	0.7501	0.07523	1.0604770
5	DCES	1.62	0.5755	-0.0125	0.8268193
6	DCES	2.47	0.4066	0.4156	1.1887150
7	DCES	2.051	0.5257	-0.2177	1.1565886
8	DCES	1.766	0.2417	0.13	0.9140080
9	DCES	2.713	0.2319	-0.1717	1.5620630
10	DCES	2.371	0.2894	0.3048	1.1973915
11	DCES	0.8181	0.8392	0.03215	0.4599805
12	DCES	1.034	1.235	0.2483	0.5214247
13	DCES	2.278	0.2603	0.2709	1.1618718
14	DCES	2.272	0.2093	0.1612	1.2050257
15	AES	2.289	0.2426	0.2037	1.1928776
16	AES	2.285	0.4544	0.1705	1.1476647
17	ASS	2.382	0.4971	0.2382	1.1701678
18	ASS	2.384	0.3302	0.3641	1.1760980
19	BCH	2.373	0.3406	0.3694	1.1651818
20	BCH	2.147	0.4289	0.03728	1.1222115
21	BCH	2.509	0.3856	0.2447	1.2685776
22	PM	2.298	0.2629	0.2381	1.1821897
23	PM	2.305	0.318	0.1587	1.1958365
24	ASD	2.216	0.3247	0.00005	1.1967211
25	ASD	2.19	0.3182	-0.05217	1.2019523
26	S1M8	2.868	0.5333	0.09225	1.4916511
27	S1M15	2.246	0.3096	0.063	1.1955435
28	S1M22	2.584	0.4629	-0.241	1.4705535
29	S2M7	1.983	0.5079	-0.154	1.0939836
30	S2M15	2.088	0.3094	-0.236	1.2153090
31	S2M24	2.085	0.3913	-0.126	1.1564846
32	S3M6	1.562	0.6542	0.187	0.6991664
33	S3M16	2.061	0.3226	-0.16	1.1681737
34	S3M23	1.675	0.4971	0.053	0.8382081
35	S4M8	1.794	0.5497	-0.097	0.9611091
36	S4M26	2.247	0.2962	0.098	1.1876521
37	S5M7	2.009	0.5546	-0.309	1.1714811
38	S5M20	1.982	0.4906	-0.163	1.0994311
39	S5M30	2.127	0.3438	-0.099	1.1783428

DCES, Duna Costera El Socorro (muestras superficiales); PM, Punta Mazo; ASE, arroyo El Socorro; ASS, arroyo San Simón; ASD, arroyo Santo Domingo; BCH, barra Chorera. Las muestras de la DCES de núcleos en las diferentes profundidades: S1M, sitio 1 (8, 15 y 22 m); S2M, sitio 2 (7, 15 y 24 m); S3M, sitio 3 (6, 16 y 23 m); S4M, sitio 4 (8 y 26 m); S5M, sitio 5 (7, 20 y 30 m).

##### 4.3.2. Mineralogía de sedimentos

El análisis de componentes principales de la mineralogía de los sedimentos mostró la formación de tres grupos claramente definidos (Figura 4). El Factor 1 representa el 94.48 % de feldespato total (Ft) y cuarzo total (Qt) y el Factor 2 muestra el 5.52 % de los fragmentos líticos (Lt). Esto indica que el feldespato y el cuarzo son los minerales que tienen mayor presencia en todas las muestras analizadas.

Las muestras superficiales tuvieron un valor crítico F de 2.03 ( $\alpha$  0.05) con una probabilidad de 1, lo que significa que no existen diferencias significativas entre las muestras superficiales analizadas de la DCES. El análisis de varianza de un factor mostró que las muestras de los cinco núcleos tanto en superficie, como a profundidad son homogéneas, con una abundancia de feldespato total de 39 a 47 % y

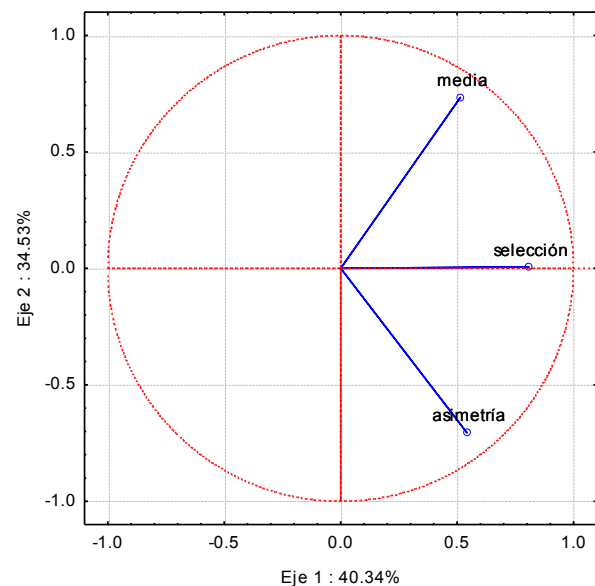


Figura 3. Análisis de Componentes Principales de los parámetros texturales: Eje 1, tamaño medio del grano y Eje 2, asimetría.

de cuarzo total de 48 a 52 %, presentando un valor de probabilidad de 0.99 ( $F = 9.48$ ) y con un valor crítico  $F$  de 3.47.

Las muestras de los tres arroyos mostraron una probabilidad de 0.99 lo cual indica que los arroyos tienen el 99 % de semejanza y un valor crítico de 3.47 ( $\alpha 0.05$ ), lo que sugiere que existen similitudes entre los tres arroyos.

#### 4.4. Proveniencia

El diagrama ternario cuarzo monocristalino, plagioclasa y feldespato potásico (QmPF) (Figura 5b), muestra que el arroyo San Simón tiene 63 % de plagioclasa y 33 % de cuarzo monocristalino y que se agrupa con las muestras

Tabla 3. Mineralogía de las muestras de arena de la duna El Socorro, de arroyos, de barra de arena y de la superficie en los alrededores de la bahía San Quintín.

Muestra	1.0	3.0	5.0	6.0	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	PM	AES	ASS	ASD	BCH	S1 M8	S1 M15	S2 M24	S3 M23	S4 M26	S5 M30	SQ-34	SQ-44	SQ-64	SQ-99	SQ-107
Qm	94	110	106	79	127	107	114	91	89	120	143	72	142	124	122	119	127	113	117	129	125	184	131	146	107
Qp	9	3	5	3	7	9	3	7	2	5	17	5	1	7	7	8	2	13	6	7	0	0	6	25	33
Feld-K	17	25	15	14	6	6	15	10	13	12	31	7	23	21	21	21	29	22	17	20	0	0	0	19	0
Plag	74	89	84	129	80	98	92	122	131	99	32	137	107	60	83	86	92	87	81	80	150	106	109	91	106
Lv	1	0	2	0	0	0	2	0	0	2	25	5	3	0	11	14	7	11	16	14	118	173	134	0	118
Ls	1	0	0	1	5	2	2	0	1	2	2	3	0	4	1	1	0	2	0	0	32	21	57	0	76
Lm	16	19	33	15	24	19	27	23	7	7	43	3	9	3	6	4	2	1	6	8	0	0	0	0	0
Densos	83	50	52	58	49	57	42	45	49	51	8	69	22	74	46	44	41	49	49	45	0	0	0	13	0
Opacos	5	4	3	1	2	2	3	2	8	2	4	4	0	7	3	3	2	2	8	2	0	0	0	6	0
Ft	43	46	40	60	35	43	42	52	59	45	22	62	46	37	41	42	47	44	40	39	58	39	54	39	53
Qt	48	46	45	34	54	48	46	39	37	51	55	33	50	60	51	50	50	51	51	53	42	61	44	61	36
Lt	8	8	14	7	12	9	12	9	3	4	24	5	4	3	7	8	3	6	9	9	0	0	2	0	11
Plag	40	40	41	58	38	47	41	55	56	43	16	63	39	29	37	38	37	39	38	35	50	35	36	36	35
Qm	51	49	52	36	60	51	41	38	52	69	33	52	61	54	53	51	51	51	54	56	39	58	45	57	39
Feld-K	9	11	7	6	3	3	7	5	6	5	15	3	8	10	9	9	12	10	8	9	11	7	19	7	25

Las muestras 1, 3, 5, 6, 10, 11, 12, 13 y 14 son muestras superficiales de la duna costera El Socorro(DCES); PM, Punta Mazo; ASE, arroyo El Socorro; ASS, arroyo San Simón; ASD, arroyo Santo Domingo; BCH, barra Chorera; S1, sitio 1 (8 y 15m); S2, sitio 2 (24 m); S3, sitio 3 (23 m); S4, sitio 4 (26 m); S5, sitio 5 (30 m); SQ, San Quintín Los minerales descritos son: cuarzo monocristalino (Qm), cuarzo policristalino (Qp), feldespato potásico (Feld-K), plagioclasa (Plag), lítico volcánico (Lv), lítico sedimentario (Ls), lítico metamórfico (Lm), feldespato total (Ft), cuarzo total (Qt), lítico total (Lt).

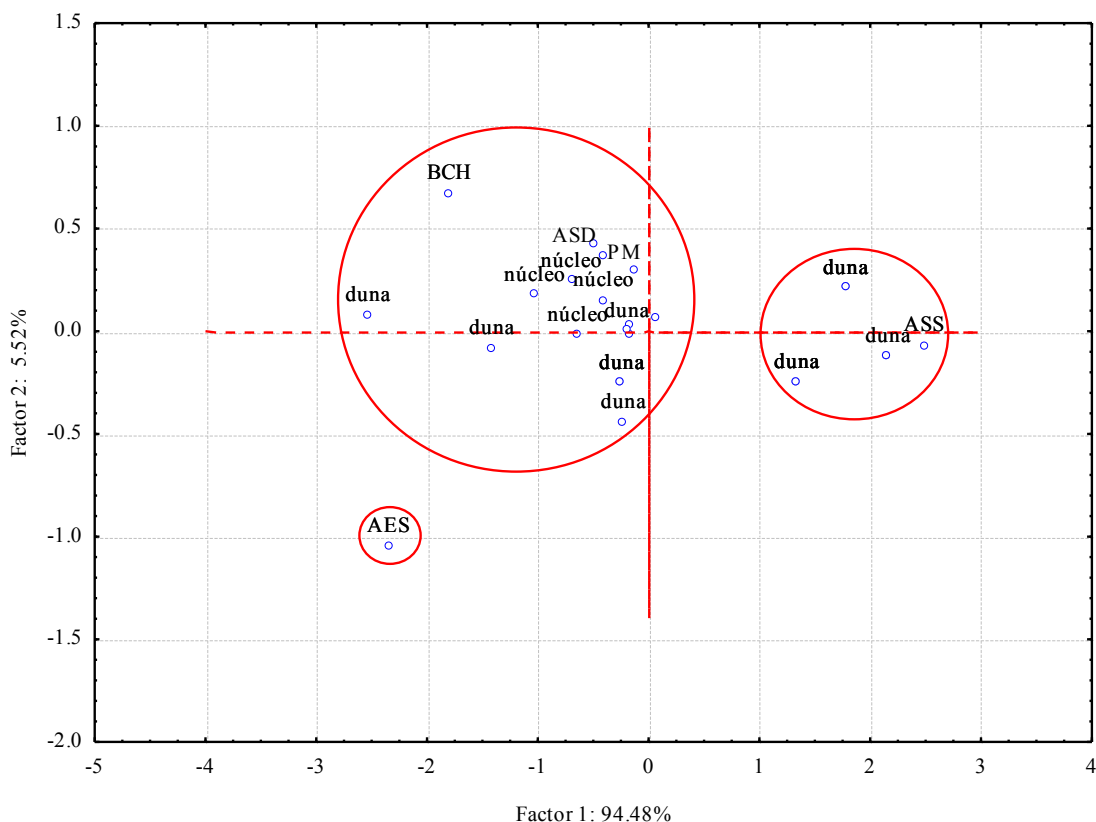


Figura 4. Gráfica de dispersión de ACP de la mineralogía de los sedimentos. Factor 1: Feldespato total (Ft) y Cuarzo total (Qt), Factor 2: Lítico total (Lt).



superficiales colectadas en la ladera sureste de la DCES, las cuales presentan 55 a 58 % de plagioclasa y 36 a 41 % de cuarzo monocristalino. Asimismo, se agrupan con la muestra SQ34 localizada justo en la desembocadura del arroyo San Simón dentro de la LCSQ. En el diagrama QmPF (cuarzo monocristalino, plagioclasas y feldespato potásico) (Figura 5b) también se observa que las muestras del arroyo Santo Domingo se agrupan claramente con las muestras de los núcleos y con las de Punta Mazo y la barrera arenosa La Chorera, así como con las muestras superficiales de la parte alta de la ladera sureste de la DCES y con las muestras SQ44 y SQ99, localizadas en la parte norte y sobre la boca de la LCSQ, respectivamente. El arroyo El Socorro se aleja de este grupo debido a su mayor contenido de cuarzo monocristalino, cercano al 70 %, y bajo contenido de plagioclasas y feldespatos potásicos de 16 y 15 % respectivamente. Las muestras SQ64 y SQ107 tienden a una misma proporción de los tres componentes. Se puede observar en los resultados (Tabla 2; Figura 5a, b) el escaso contenido de minerales opacos (como magnetita e ilmenita > 1 % en volumen).

## 5. Discusión

La DCES presenta una gran cantidad de feldespato potásico por lo que es un sedimento cuarzo-feldespático de acuerdo a la clasificación mineralógica de las arenas de Okada (1971).

Melgarejo *et al.* (2010) mencionan que este tipo de análisis detallado de la mineralogía de un sitio no sólo tiene connotaciones académicas, sino que puede servir para otro tipo de sectores. Como menciona León (2001), las diferentes

técnicas empleadas sirven para mejorar los análisis y hacer más eficaz su uso y sus resultados. Como se pudo observar en el presente estudio, los análisis efectuados mostraron que la DCES no es un sitio potencial de extracción de minerales ferruginosos, sino para la explotación de otros minerales como cuarzo y feldespatos, minerales más valiosos que el hierro. Abuodha (2002) menciona que se realizaron estudios de exploración en varios sitios de dunas en Kenya para ver el potencial de titanio y circonio. Este autor menciona que uno de los impactos ambientales sería la contaminación de las aguas costeras, remoción de la vegetación, y erosión. Ante esto, muchos expresaron su preocupación por las cuestiones ambientales, ya que la minería de titanio es dañina para el ambiente.

Los sedimentos de la duna El Socorro provienen del arroyo Santo Domingo, ya que la composición mineralógica que se encontró mostró la relación de la madurez textural entre los minerales de ambos sitios. El análisis modal del diagrama ternario QtFtLt (Figura 5a) indicó que las muestras superficiales de la cima donde se localizan las dunas móviles, las muestras de las laderas en la cima de la duna estabilizada y las muestras de núcleos, se agrupan claramente junto con las muestras de Punta Mazo y barrera arenosa la Chorera, justo en la zona donde se ubica la muestra del arroyo Santo Domingo.

El análisis mineralógico mostró que a pesar de que el arroyo El Socorro está junto a la DCES no le aporta ningún sedimento; en contraste los minerales del arroyo Santo Domingo que se localiza a 45 km al norte de la zona de estudio, y la mineralogía de la DCES, es similar.

Como mencionan Daesslé *et al.* (2009), las muestras obtenidas dentro de la zona de bahía Falsa en la LCSQ (SQ64 y SQ107) tienen una misma proporción de cuarzo

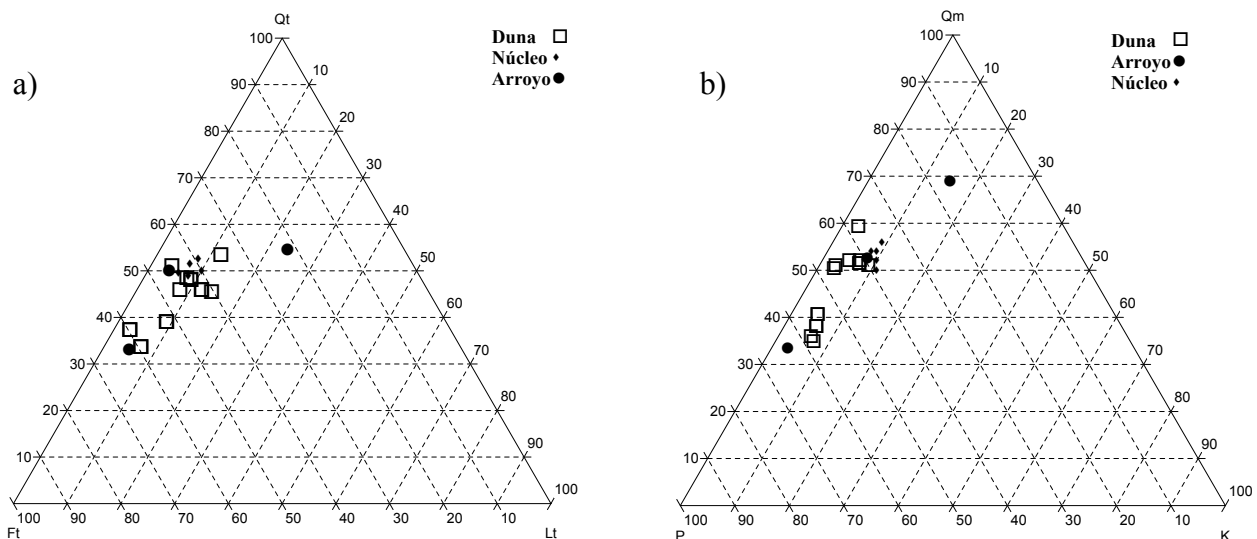


Figura 5. Diagramas ternarios mineralógicos de las muestras de arena de la duna El Socorro (superficiales y núcleos), arroyos y laguna costera San Quintín (LCSQ). La figura 5a muestra la concentración de cuarzo, feldespato y líticos totales, y la figura 5b, la de cuarzo monocristalino, plagioclasas y feldespato potásico.

monocristalino, plagioclasas y feldespatos que la que se presenta en la duna El Socorro.

De acuerdo con Dickinson *et al.* (1983) y Cabrera-Ramírez y Carranza-Edwards (2002), la arena de la DCES proviene de un basamento levantado con una transición continental. Esta proveniencia es esperada debido a que los tres arroyos, que rodean la zona de estudio, nacen en la cordillera peninsular formada por el basamento granítico-metamórfico que se ha ido erosionando paulatinamente. Cuando estos arroyos arrojan el material al mar, éste es re-trabajado por la corriente litoral y acumulado en las playas; de ahí, los vientos dominantes lo transportan tierra adentro formando grandes sistemas de dunas costeras tal y como se observa en la zona de estudio (Figura 6).

Daesslé *et al.* (2009) mencionan que la composición mineralógica mostró un alto porcentaje de cuarzo y plagioclasas (< 70 %) en el análisis petrográfico que hicieron en los sedimentos superficiales de la bahía de San Quintín. En coincidencia con lo anterior, en el presente estudio la composición mineralógica de la DCES mostró la misma abundancia de minerales lo que sugiere que los sedimentos que se encuentran en LCSQ son transportados por la acción del viento y del oleaje hacia ella.

La relación entre la mineralogía de arena y la tectónica ha sido, y continúa siendo, un tema central en petrología de piedra arenisca. La composición mineral se presume que refleja la historia tectónica tanto del área de la fuente como del sitio de deposición (Krynine, 1943).

Dicho supuesto se basa en la idea de que los tipos y proporciones de los componentes básicos, cuarzo, feldespato y fragmentos de roca de arenisca, reflejan una proveniencia que varía de forma ordenada con el ajuste de las placas tectónicas (Dickinson y Sucsek, 1979) y que varía con el marco tectónico de un lugar específico. Como se menciona en el trabajo de Paskoff y colaboradores (2003), para determinar cuál es el origen de las dunas de Copiapó en el desierto de Atacama, las características sedimentológicas químicas, petrográficas y granulométricas son un indicador para proponer que la proveniencia no es marina sino fluvial.

## 6. Conclusiones

La DCES se compone principalmente de cuarzo, feldespatos y plagioclasas con menores cantidades de fragmentos líticos y abundantes minerales densos entre un 40 a 80 %, principalmente hornblenda y trazas de piroxeno, pero escaso contenido de minerales ferruginosos como magnetita e ilmenita (> 1 % en volumen). La caracterización mineralógica y los parámetros texturales permiten inferir que la fuente del sedimento que dio origen a la DCES es el arroyo Santo Domingo cuya desembocadura se localiza a 45 km al norte de la zona de estudio. El mecanismo de transporte es por corrientes litorales y eólico. Las corrientes en esa zona son en dirección norte-sur, donde a lo largo del litoral, el sedimento es acarreado desde la desembocadura

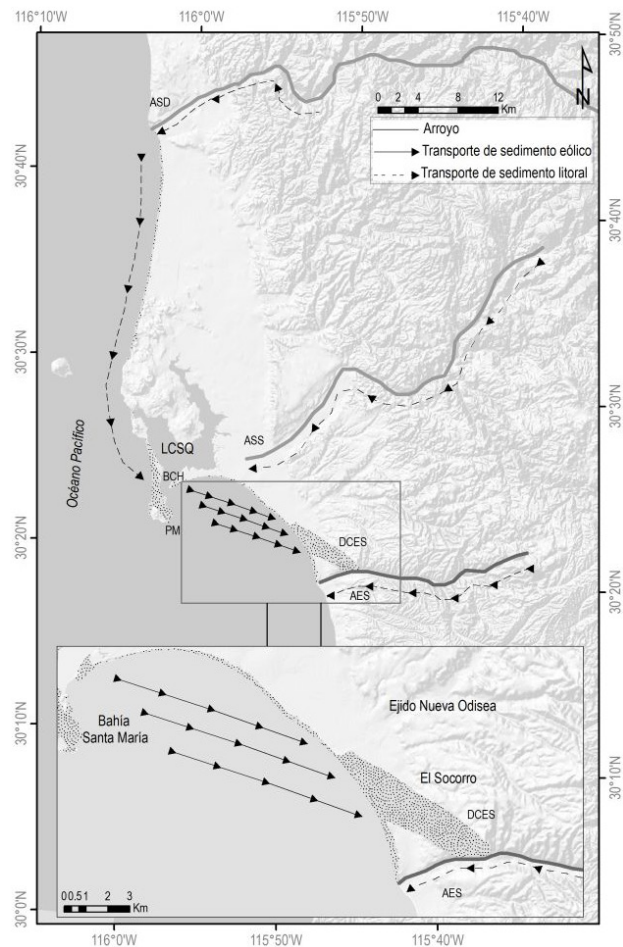


Figura 6. Mapa regional donde se observa el arroyo Santo Domingo, que aporta sedimentos a la barra arenosa que delimita la BSQ y forma la duna El Socorro, ejido Nueva Odisea, San Quintín, Baja California. Los triángulos en la DCES corresponden a los sitios de muestreo.

del arroyo Santo Domingo hacia la barrera arenosa La Chorera y Punta Mazo al sur. Por otro lado, los vientos predominantes en esa zona son del noroeste. El viento es tan intenso que este sedimento depositado en estas barreras arenosas de Punta Mazo y Punta Azufre en LCSQ, transporta el sedimento hasta la playa de la DCES y posteriormente depositan grandes cantidades de sedimento en la zona de estudio.

Este estudio permitió también conocer que el arroyo Santo Domingo aporta material a la barrera arenosa La Chorera, la cual es de importancia ecológica ya que protege a las poblaciones de ostión. Finalmente, el presente trabajo sugiere que el medio de transporte del sedimento que abastece a la DCES es por oleaje y eólica.

## Agradecimientos

A Francisco Casillas, Soledad Valdés y Eduardo Gil por la ayuda en la colecta de las muestras en campo; a Víctor



Pérez por la ayuda y asesoría en el montaje de las muestras en el laboratorio de preparación de rocas del CICESE; a Óscar Delgado por la salida al campo para la colecta de las muestras de arroyos, a Marysol Ramírez García por la ayuda en el procesamiento de las muestras; y al Ing. Jorge Díaz por brindar las muestras de los núcleos. Este trabajo contó con el financiamiento del proyecto “Flora de playas y dunas de México” CONABIO, clave HJ007 y de la Red de Manejo Costero de PROMEP.

## Referencias

- Abuodha, J.O.Z., 2002, Environmental impact assessment of the proposed titanium mining project in Kwale district, Kenya: Marine Georesources and Geotechnology, 20, 199-207.
- Ahmad, N., Prashad, S., 1970, Dispersion, mechanical composition and fractionation of West Indian volcanic yellow earth soil (Andepts): Soil Science, 21, 63-71.
- Cabrera-Ramírez, M., Carranza-Edwards, A., 2002, The beach environment in Mexico as a potencial source of placer minerals: Marine Georesources and Geotechnology, 20, 187-198.
- Carranza-Edwards, A., Bocanegra-García, G., Rosales-Hoz, L., de Pablo-Galán, L., 1998, Beach sands from Baja California Peninsula, México: Sedimentary Geology, 119, 263-274.
- Carter, R.W.G., 1991, Coastal Environments: London, Great Britain Academic Press, 617 p.
- Daesslé, L.W., Rendón-Márquez, G., Camacho-Ibar, V.F., Gutierrez-Galindo, E.A., Shumilin, E., Ortiz-Campos, E., 2009, Geochemistry of modern sediments from San Quintín coastal lagoon, Baja California: Implications for provenance: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 26, 117-132.
- Davis, J., 1986, Statistics and Data Analysis in Geology: New York, U.S.A., John Wiley, 647 p.
- Day, R.P., 1965, Hydrometer method of particle size analysis, en Black, C.A. (ed.), Methods of Soil Analysis, Agronomy 9: Madison, U.S.A., American Society of Agronomy, 545-552.
- Dickinson, W.R., Beard, S.L., Brakenridge, G.R., Erjavec, J.L., Ferguson, R.C., Inman, K.F., Knepp, R.A., Lindberg, F.A., Riberg, P.T., 1983, Provenance of North American phanerozoic sandstones in relation to tectonic setting: Geological Society of America Bulletin, 94, 222-235.
- Dickinson, W.R., Suczek, C.A., 1979, Plate tectonics and sandstone compositions: American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 63, 2164-2182.
- Espejel, I., Peña-Garcillán, P., Moreno-Casasola, P., Castillo, G., León de la Luz, J.L., Sánchez, J., Castillo, S., Durán, R., 2013, Proyecto de Flora de Playas y Dunas Costeras de México, HJ007: México, Comisión Nacional para el Uso y Conocimiento de la Biodiversidad, 3<sup>er</sup> Informe Técnico, 155 p.
- Folk, R.L., Ward, W.C., 1957, Brazos River bar, a study of significance of grain-size parameters: Journal of Sedimentary Petrology, 27, 3-26.
- Gastil, R.G., Phillip, R.P., Allison, E.C., 1975, Reconnaissance Geology of the State of Baja California: The Geological Society of American, 140, 170pp.
- Ingersoll, R.V., Bullard, T.F., Ford, R.L., Grimn, J.P., Pickle, J.P., Sares, S.W., 1984, The effect of grain size on detrital modes: a test of the Gazzi-Dickinson Point Counting method: Journal of Sedimentary Petrology, 54, 103-116.
- Kasper-Zubillaga, J.J., Carranza-Edwards, A., 2005, Grain size discrimination between sands of desert and coastal dunes from northwest Mexico: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 22, 383-390.
- Krynine, P.D., 1943, Diastrophism and the evolution of the sedimentary rocks: Geological Society Digest, 11, 1-24.
- León, A.R., 2001, Comparación de métodos de análisis mecánico de suelos: Terra, 19, 219-225.
- Melgarejo, J.C., Proenza, J.A., Galí, S., Llovet, X., 2010, Técnicas de caracterización mineral y su aplicación en exploración y explotación minera: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 62, 1-23.
- Moreno-Casasola, P., 2006, ¿Qué significa vivir en la zona costera? Sección II. Caracterización física y biológica de la zona costera, en Moreno-Casasola P., Peresbarbosa R.E., Travieso Bello A.C. (eds), Estrategias para el manejo costero integral: el enfoque municipal: Xalapa, México: Instituto de Ecología, A. C., Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas y Gobierno del estado de Veracruz-Llave, 53-80.
- Moreno-Casasola, P., Monroy, I.R.C., Peresbarbosa, R.E., 2006, Desarrollo socioeconómico de la costa de México. Sección III. Caracterización social y económica de la zona costera, en Moreno-Casasola P., Peresbarbosa, R.E., Travieso Bello, A.C. (eds.), Estrategias para el manejo costero integral: el enfoque municipal: Xalapa, México, Instituto de Ecología, A.C., Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas y Gobierno del estado de Veracruz-Llave, 390-399.
- Okada, H., 1971, Classification of sandstone: analysis and proposal: Journal of Geology, 79, 509-525.
- Oliva, A.R., 2010, Arenas de hierro y titanio de las playas guatemaltecas para una minería: Observatorio de Conflictos Mineros de América Latina, actualizado 15 de Septiembre de 2010, <http://www.conflictosmineros.net>, consultado el 11 de mayo de 2012.
- Paskoff, R., Cuitiño, L., Manríquez, H., 2003, Origen de las arenas de la región de Copiapó, desierto de Atacama, Chile: Revista Geológica de Chile, 30, 355-361.
- Peinado, M., Aguirre, J.L., Delgadillo, J., González, J., Martínez-Parras, J.M., 2005, A phytosociological survey of the Chionophilous communities of western North America. Part II. Boreal associations: Plant Ecology, 180, 243-256.
- Rendón, M.G., 1995, Técnicas petrográficas para el estudio de rocas y sedimentos en el laboratorio de petrología del CICESE: Ensenada, México, Comunicaciones académicas, Serie Geología, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, informe técnico CTGOT9501, 33 p.
- Rosales-Hoz, L., Carranza-Edwards, A., Aguirre-Gómez, A., Galán-Alcalá, A., 1988, Estudio de metales en sedimentos litorales de Sonora, México: Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, 2, 1-12.
- Secretaría General de Gobierno (SEGOB), 2007, Programa de Ordenamiento Ecológico de la Región de San Quintín: Mexicali, Baja California, Periódico Oficial del Estado de Baja California, Tomo CXIV (25), 15 de junio de 2007, 222 p.
- Van Aarde, R.J., Wassenaar, T.D., Niemand, L., Knowles T., Ferreira, S., 2004, Coastal dune forest rehabilitation: A case study on Rodent and bird assemblages in northern KwaZulu-Natal, South Africa, en Martínez M.L., Psuty, N. (eds), Coastal Dunes: Ecology and Conservation: Berlin, Springer-Verlag, 103-113.
- Van der Maarel, E., 1993, Dry Coastal Ecosystems - Africa, America, Asia and Oceania, Ecosystem of the World, 2B: Amsterdam, Netherlands, Elsevier Science Publishers, 616 p.
- Vanderplank, S., 2011, The flora of the greater San Quintín, Baja California, México (2005-2010): Aliso, 29, 65-106.
- Wentworth, C.K., 1922, A scale of grade and class terms for clastic sediments: Journal of Geology, 30, 377-392.
- Williams, H., Turner, F.J., Gilbert, C.H.M., 1968, Petrografía, Introducción al estudio de las rocas en secciones delgadas, Capítulo 16, Areniscas: México, D. F., Editorial Continental, 305-339.

Manuscrito recibido: Febrero 28, 2013.

Manuscrito corregido recibido: Septiembre 18, 2013.

Manuscrito aceptado: Septiembre 25, 2013.