

ORIGEN COMPOSICIONAL Y ALTERACIÓN QUÍMICA
EN DUNAS DEL DESIERTO Y COSTERAS DEL ESTADO DE SONORA, MÉXICO

Dedico esta Tesis

con todo mi corazón

a mis padres

Lourdes y Hugo,

a mi hermana Charlene

y a mi sobrina Esperanza.

“Por mi raza hablará el espíritu”

UNAM, CU, 2005.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

**“ORIGEN COMPOSICIONAL Y ALTERACIÓN QUÍMICA EN DUNAS DEL
DESIERTO Y COSTERAS DEL ESTADO DE SONORA, MEXICO”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A:

HUGO ZOLEZZI RUIZ

MÉXICO, D. F. 2005

ÍNDICE GENERAL

	Página
i. RESUMEN	5
ii. INTRODUCCIÓN	6
iii. ANTECEDENTES	15
iv. OBJETIVO	17
v. HIPÓTESIS	18
vi. JUSTIFICACIÓN	18
I. ÁREA DE ESTUDIO	
I.I. DESIERTO DE ALTAR	20
I.II. RASGOS GENERALES	20
I.III. GEOLOGÍA	22
I.IV. SEDIEMNTOS Y MORFOLOGÍA DE LAS DUNAS	23
I.V. METODOLOGÍA DE CAMPO	24
II. METODOLOGÍA	
II.I. GRANULOMETRÍA	24
II.II. PETROLOGÍA	25
II.III. GEOQUÍMICA	25
II.III. ESTADÍSTICA PARAMÉTRICA DE DATOS SEDIMENTOLÓGICOS	26
III. RESULTADOS Y DISCUSIONES	
III.I. GRANULOMETRÍA	27
III.II. PETROLOGÍA	31
III.III. GEOQUÍMICA	41
III.III. ESTADÍSTICA PARAMÉTRICA DE DATOS SEDIMENTOLÓGICOS	47
IV. CONCLUSIONES	52
V. AGRADECIMIENTOS	54
VI. REFERENCIAS	55
VII. ANEXO FOTOGRÁFICO	61

INDICE DE TABLAS Y FIGURAS

	Página
 TABLAS	
Tabla 1. Granulometría.....	28
Tabla 2. Análisis Modal Petrográfico.....	34
Tabla 3. Composición Petrográfica en porcentaje.....	35
Tabla 4. Composición Petrográfica Normalizada al 100% (C _T - F _T - L _T).....	36
Tabla 5. Composición de Líticos Normalizada al 100% (L _V - L _S - L _M +L _P).....	37
Tabla 6. Composición Química de Elementos Mayores.....	43
Tabla 7. Pruebas de normalidad Kolmogorov - Smirnov con n=54, D=0.21.....	47
Tabla 8. Análisis discriminante.....	48
Tabla 9. Datos de entrada del análisis discriminante.....	49
 FIGURAS	
Figura 1y2 .Carta geológica del área de estudio.....	23
Figura 3. Composición petrológica normalizada al 100% (C _T - F _T - L _T)	38
Figura 4. Polígonos de la desviación estándar (C _T - F _T - L _T)	38
Figura 5. Elipses, vista ampliada del polo C _T (C _T - F _T - L _T)	39
Figura 6. Elipses, diagrama ternario normalizado al 100% (C _T - F _T - L _T)	39
Figura 7. Composición de líticos normalizada al 100%(L _V - L _S - L _M +L _P)	40
Figura 8. Composición de líticos normalizada al 100% vista ampliada polo L _S (L _V - L _S - L _M +L _P).....	40
Figura 9. Polígonos, composición de líticos normalizados al 100% (L _V - L _S - L _M +L _P).....	40
Figura 10. Elipses, composición de líticos normalizada al 100%.....	41
Figura 11. Polígonos de la desviación estándar, composición química de elementos mayores normalizada al 100% (SiO ₂ - Al ₂ O ₃ +Na ₂ O+K ₂ O - Fe ₂ O ₃ +TiO ₂ +MgO).....	45
Figura 12. Elipses, composición química de elementos mayores normalizada al 100% (SiO ₂ - Al ₂ O ₃ +Na ₂ O+K ₂ O - Fe ₂ O ₃ +TiO ₂ +MgO).....	45
Figura 13. Análisis canónico discriminante.....	50
Figura 14. Dendrograma del análisis de conglomerados de los datos geoquímicos.....	51

i. RESUMEN

La arena de cuatro localidades de dunas del desierto (n= 30) y costeras (n= 24) del estado de Sonora, México, fue estudiada desde el punto de vista sedimentológico, petrográfico y geoquímico. Los resultados sedimentológicos muestran que las dunas desérticas de San Luis Río Colorado y El Pinacate tienen distribuciones de tamaño de grano influidas por el transporte eólico. En contraste, las dunas costeras del Golfo de Santa Clara y Puerto Peñasco tienen distribuciones de tamaño de grano influidas por el transporte litoral, eólico y fluvial.

La composición del delta del Río Colorado y de las playas también influyen en las distribuciones de grano en las dunas, especialmente en San Luis Río Colorado, el Golfo de Santa Clara y Puerto Peñasco. Las dunas de las cuatro localidades son mineralógicamente maduras lo cual sugiere que la selectividad del viento ha influido en su composición petrográfica.

La geoquímica muestra que las dunas de las cuatro localidades son similares en su composición. Sin embargo, los valores de índice de alteración química son ligeramente menores para Puerto Peñasco posiblemente por la variación en feldespatos de K y Na. El modelo cuantitativo basado en diagramas ternarios con elipses (límites logísticos de confianza al 90 %) es estadísticamente riguroso para observar la dispersión en la composición petrológica y química de las arenas.

El análisis discriminante y de conglomerados separan de manera efectiva las localidades con características sedimentológicas y geoquímicas propias. En otras épocas, el Río Colorado aportaba sedimento procedente del Cañón del Colorado al delta del río. Posteriormente este sedimento se integraba a la composición de las dunas en San Luis Río Colorado, Golfo de Santa Clara y Puerto Peñasco, preferentemente. Actualmente este aporte de sedimento ya no existe, debido al represamiento del cauce del Río Colorado en E.U.A. y México.

Por tanto, es probable que la composición de las dunas este influida por la interrupción del transporte de sedimento del Río Colorado y el aporte de sedimentos relictos del Delta del Colorado.

ii. INTRODUCCIÓN

DUNAS

Las dunas son depósitos sedimentarios producidos por el transporte eólico de sedimento y su depositación sobre el suelo o la roca. Las dunas se presentan en diferentes zonas climáticas y geográficas en donde existen fuentes constantes de sedimento y mecanismos de transporte y depositación. Las dunas pueden cubrir grandes extensiones de terreno y alcanzar alturas de cientos de metros dependiendo del suministro de sedimento; geomorfología del área, clima y de la razón transporte-erosión-depositación (Livingstone et al., 1999; Muhs et al., 2003). Existen campos de dunas tanto en el desierto como en la costa y en los deltas de los ríos. Las fuentes de sedimento para las dunas pueden ser fluviales, marinas o eólicas (Blount & Lancaster, 1990; Muhs et al., 2003). El sedimento seleccionado por el viento para formar las dunas, se encuentra en depósitos expuestos; a lo largo del cauce de los ríos en las riveras, lechos y deltas; y en los demás cuerpos de agua continentales y costeros, en las playas y los lechos. En condiciones de baja humedad, el sedimento que yace sobre el suelo queda expuesto a la acción del viento. Debido a la fuerza del viento, el sedimento es suspendido en el aire. Una vez suspendidas, las partículas finas son transportadas hasta que la fuerza del viento no es capaz de sostenerlas en el aire (Bagnold & Barndorff-Nielsen, 1980; Pye & Tsoar, 1990). Las partículas más pesadas vuelven a caer al suelo, rebotan y algunas vuelven a ser resuspendidas en el aire por saltación. Los granos más gruesos que el viento logra mover, son golpeados por el impacto de arrastre de los granos que rebotan durante la saltación, creando una reacción en cadena en las partículas.

Dependiendo de la dirección y velocidad del viento, del relieve de la superficie del terreno y de la vegetación existente en la zona de dunas, éstas, presentan diferentes características geomorfológicas. En las dunas se identifican tres zonas de acuerdo al punto de incidencia del viento sobre ellas: el barlovento, la cresta y el sotavento. Las superficies adyacentes a la cresta se conocen también como flancos.

Las dunas son activas cuando presentan el fenómeno de la migración, el cual es debido a la erosión y transporte del sedimento de la duna (Blount & Lancaster, 1990; Sweet et al., 1988). Sobre la pendiente en que incide el viento, se genera el proceso de saltación, los granos de arena son arrastrados hasta la cresta por la fuerza del viento. Una vez que los granos alcanzan la cresta se precipitan y se deslizan sobre la cara de caída hasta que la fuerza de fricción detiene su movimiento. Entonces comienza la depositación de los granos sobre dicha

pendiente. La migración de las dunas se produce en una dirección oblicua a la dirección del viento (Sweet et al., 1988).

En los Deltas, es muy frecuente encontrar formaciones de dunas. Las dunas en los Deltas son formadas por el transporte eólico de sedimento y su depositación. Las fuentes del sedimento pueden ser fluviales, costeras o aéreas. Las fuentes del sedimento en los Deltas pueden ser los depósitos en la planicie del Delta, las corrientes costeras y los vientos dominantes. La deflación produce la depositación de arena del fondo marino sobre la planicie del Delta durante el cambio de mareas. Las corrientes marinas superficiales y profundas están involucradas en la depositación de sedimento sobre la planicie del Delta. La duna de arena del Delta, puede estar compuesta tanto por material del fondo marino como por depósitos aluviales en distintas proporciones; dependiendo de las fuentes del sedimento, de los procesos involucrados y el tipo de roca madre del sedimento. En el caso del noroeste de Sonora, es posible que la formación de dunas desérticas y costeras estén influidas por el Delta del Río Colorado (Blount & Lancaster, 1990; Muhs et al., 2003).

DUNAS DESÉRTICAS

Las dunas desérticas son formaciones de arena que se rigen por variaciones temporales y espaciales en la acumulación de arena. Debido al transporte de sedimento por el viento, la geomorfología del área desértica, la proximidad de la roca fuente de la arena y el clima (Lancaster, 1995). Las dunas desérticas están presentes en todos los tipos de desiertos, su formación es debida a la acción del viento. Las marcas del clima que nos ofrecen las dunas constituyen una base para el estudio del paleoclima. La formación de dunas equivale a periodos de aridez. Se infiere una relación entre la aridez regional y las dunas de arena del desierto, reforzada por el impacto visual de las dunas localizadas en condiciones secas y de altas temperaturas.

En el pasado, en algunos casos existieron condiciones de humedad, en donde grandes lagos ocupaban las superficies de los desiertos (e.g. Desiertos del Sahara y Namibia en África; y los desiertos del SW de América del Norte) (Clarke & Rendell, 1998). El sedimento contenido en la cuencas de éstos depósitos de agua dieron formación a las dunas, una vez expuestos a la atmósfera durante las sequías. En la actualidad estas regiones son desérticas, y nos indican el cambio climático que ha sufrido la zona de estudio a lo largo de las eras geológicas.

La datación realizada para determinar el tiempo de formación de las dunas de arena del Desierto de Mojave en California , EUA, ha mostrado que el 94% de las arenas se depositaron en tiempos cuando los lagos inundaban varias cuencas y los río inundaban estas zonas. El cambio climático puede detonar una aporte de sedimento para los corredores de transporte de arena y acreción de las dunas. Las tormentas y el cambio climático son factores controladores durante los periodos de formación de las dunas (Clarke & Rendell, 1998).

De acuerdo con la forma que presentan las dunas desérticas, existen dunas barchanes ó crecientes, transversales, lineales, parabólicas y en forma de estrella (Blount & Lancaster, 1990; Pye and Tsoar, 1990; Livingstone et al., 1999; Muhs, 2003; Wang et al., 2004).

Las dunas barchanes ó crecientes son aquellas que presentan forma creciente con el medio punto del arco apuntando hacia la dirección del viento. Se forman en áreas donde la superficie del terreno es dura y donde existe una fuente moderada de arena en donde el régimen del viento presenta una dirección constante.

Las dunas transversales son grandes campos de dunas que parecen ondas de arena a gran escala. Consisten de lomos de arena con pendientes pronunciadas en la cara viento abajo y se forman en zonas con fuentes abundantes de arena y donde el régimen del viento presenta una dirección constante. Las dunas barcanas se convierten en dunas transversas si la fuente a arena se incrementa. La dirección del viento es perpendicular a la línea de las crestas.

Una duna lineal es aquella en donde el transporte neto de arena es paralelo a la cresta, en dónde el eje más largo es muchas veces mayor a su ancho. Se forman en donde existe una fuente limitada de arena y donde los vientos son convergentes sobre la línea de la cresta.

Las dunas parabólicas son en forma de “u” con la parte abierta frente a la dirección del viento. Generalmente se encuentran estabilizadas por vegetación y por una dirección constante del régimen del viento. Tienen una fuente constante de arena y se presentan comúnmente en zonas costeras.

Las dunas en estrella presentan diverso brazos y caras de caída en diferentes direcciones , se forman en áreas donde la fuente de arena es abundante y en donde el régimen del viento varía en diferentes direcciones (Folk, 1971).

DUNAS COSTERAS

Las dunas costeras constituyen un ambiente sedimentario transicional entre la costa y el continente, las cuales tienen la función de proteger la playa y reflejan la acción de los procesos marinos de erosión y depositación que se producen en la playa (Komar, 1976; Reineck & Singh, 1980, Carter et al., 1990). La duna costera actúa como amortiguador en los procesos costeros, especialmente durante épocas de tormenta y períodos con procesos costeros impredecibles.

Las dunas costeras se forman a partir de diferentes procesos como la deflación, el transporte aéreo del sedimento, el transporte de la playa a la duna y la depositación del sedimento en la duna. También, la descarga fluvial de sedimento contribuye a la formación de dunas costeras (Kasper-Zubillaga & Dickinson, 2001; Abuodha, 2003). Las dunas costeras representan el equilibrio entre la dinámica costera y los procesos continentales, incluyendo cobertura de vegetación, especies animales y ambiente terrestre (Moreno-Casasola, 2004).

CARACTERÍSTICAS GRANULOMÉTRICAS, PETROGRÁFICAS Y GEOQUÍMICAS DE LA ARENA DE DUNA

La composición de la arena de las dunas, se caracteriza por la distribución granulométrica, la composición petrológica y la composición química que presentan. Las dunas pueden presentar una composición sedimentológica tanto homogénea como heterogénea dentro de una misma zona de estudio. La composición sedimentológica de las dunas está en función de muchas variables (Livingstone, 1989; Kasper-Zubillaga & Dickinson, 2001; Honda & Shimizu, 1998). El tipo de roca madre del sedimento, así como los procesos de producción, transporte y depositación del sedimento influyen en la composición de la arena. Estos procesos están en función de las condiciones climáticas, meteorológicas, geográficas, geológicas, geofísicas, oceanográficas, limnológicas y biológicas del área de estudio. El sedimento de las dunas es producido por la intemperización de la roca. En el proceso de intemperización de la roca actúan procesos físicos, químicos y biológicos. Dependiendo del tipo de roca madre del sedimento y de las condiciones fisiográficas, climatológicas, meteorológicas y biológicas de la zona de estudio la composición del sedimento cambia de una localidad a otra. La composición de la dunas refleja por tanto los procesos de formación de las dunas y la procedencia del sedimento. La roca se intemperiza mecánicamente por la lluvia, los flujos de calor, la expansión del hielo, las raíces y por la abrasión de las partículas. Provocando la disgregación de las rocas, produciendo rocas de tamaño menor, hasta llegar a producir partículas pequeñas formando arena.

La evolución de la composición, en las etapas tempranas del intemperismo, esta gobernada por la disgregación de los fragmentos de rocas en sus componentes esenciales (cuarzo, feldspatos, micas, minerales pesados) (Weltje, 2002). El intemperismo, debido a la acción química del agua -ya sea pluvial, costera o fluvial- en el sedimento, se produce cuando el agua y el suelo forman soluciones; mismas que reaccionan químicamente entre sí formando nuevos tipos de sedimento (diagénesis). La lluvia y su acidez, el agua subterránea, los procesos en los suelos y los efectos bióticos (causados por organismos) actúan sobre el sedimento alterando su composición química y tamaño de grano. Las reacciones químicas se llevan a cabo de acuerdo con las consideraciones termodinámicas, cinéticas y de balance de masa propuestas por Nesbitt & Young (1984). Por ejemplo, las plagioclasas de calcio y sodio son más resistentes al intemperismo químico que los feldspatos de potasio. En contraste, el cuarzo en comparación con los feldspatos es un mineral mas estable (Nesbitt & Young, 1989). El intemperismo químico, influye en la composición del sedimento así como en su distribución granulométrica (Nesbitt & Young, 1989). El intemperismo químico actúa en algunos minerales no - cuarcíticos los cuales se degradan en minerales arcillosos. El cuarzo y otros minerales resistentes se aíslan del sedimento arcillosos y son lavados aguas abajo por la acción de las corrientes que los transporta hacia las partes bajas de las cuencas. Los minerales primarios presentes en el sedimento se transforman en minerales secundarios (minerales arcillosos) (Nesbitt & Young, 1989).

GRANULOMETRÍA DE ARENAS

La granulometría se encarga del estudio de las características asociadas al tamaño de los granos, constituyentes de los sedimentos. Los parámetros granulométricos son el tamaño de grano (M_z), el clasificación (σ), la asimetría (S_{ki}) y la curtosis (K_G) (Folk & Ward, 1957). La distribución granulométrica depende de los procesos físicos, químicos y biológicos, de la resistencia física del sedimento así como de su estabilidad química.

Para determinar el tamaño de grano de las arenas, así como las características de la curva de distribución, nos referimos al análisis con granulómetro scanner láser (Livingstone et al., 1999). El scanner láser envía en el archivo de salida los parámetros de tamaño de grano, clasificación, asimetría y curtosis. La unidad del tamaño de grano M_z que utilizamos, esta dado en unidades "phi, Φ ". Esta unidad es calculada por el granulómetro láser automáticamente y se determina mediante la ecuación de Folk & Ward (1957), $\Phi = - 3.3219 \log d$ (d = diámetro de la partícula en mm). En cuanto a las arenas, podemos decir que el tamaño de grano es fino a

grosso dependiendo del valor Mz . Las arenas finas están en el rango de valores positivos entre 2Φ y 3Φ (Kasper-Zubillaga et al., 1999). Las arenas gruesas están en el rango de valores negativos. Algunos autores consideran a los muy finos en el rango menor a $45 \mu\text{m} = 4.47 \Phi$ (Folk, 1971). Las dunas de arena se clasifican de acuerdo al tamaño de grano en dunas de crestas finas y dunas de crestas gruesas (Lancaster, 1988; Livingstone et al., 1999; Kasper-Zubillaga & Dickinson, 2001; Abuodha, 2003).

La clasificación, es la desviación estándar que presentan los valores del tamaño de grano de las muestras de arena. La arena de las dunas de acuerdo al clasificación que presenta se clasifica en muy bien sorteada <0.35 , bien sorteada $0.35 - 0.50$, moderadamente bien sorteada $0.50 - 0.71$, moderadamente sorteada $0.70 - 1.00$, pobremente sorteada $1.00 - 2.00$, muy pobremente sorteada $2.00 - 4.00$ y extremadamente pobremente sorteada >4.00 . Estadísticamente la desviación estándar es la medida de dispersión de los valores de la media. Una arena bien sorteada nos indica que la selección de los granos es regular. Por el contrario un clasificación pobre nos habla de una gran heterogeneidad en el tamaño de los granos de la arena de las dunas (Folk, 1971).

La asimetría es una medida del grado de no – normalidad de la distribución de tamaño de grano. La curva de distribución de tamaño de grano puede ser negativa o positivamente asimétrica. Una asimetría positiva ($Ski > 0$) representa un cola fina en la distribución (estos es, mas cantidad de material fino en la distribución normal). Una asimetría negativa ($Ski < 0$) representa una cola gruesa en la distribución (relativamente más material grueso) . Cuando la asimetría tiende a cero hablamos entonces de que el sedimento es simétrico. Lo cual significa que tenemos tanto la misma cantidad de finos como gruesos relativamente. Los grados de asimetría podemos describirlos como asimetría gruesa ($-0.3 < Ski < -0.1$), fuertemente gruesa ($-0.3 > SKE$), casi simétrica ($-0.1 < Ski < 0.1$), fina ($0.1 < Ski < 0.3$), fuertemente fina ($Ski > 0.3$) y desconocida (no se reportan datos). De esta forma los valores con asimetrías finas, nos indican la presencia de más finos en las muestra. De forma contraría una asimetría gruesa nos indica una composición con más granos gruesos (Folk, 1971).

La curtosis nos indica que tan próxima a la curva de normalidad Gaussiana ($K_G=1$) es la curva de normalidad de la distribución del tamaño de grano de las arenas. La curtosis esta basada en la extensión de las colas de la curva de normalidad. Las curvas de normalidad con colas largas son llamadas "leptocúrticas" ($K_G > 1$; $1.11 < K_G < 1.50$); y aquellas con colas cortas

son llamadas "platicúrticas" ($K_G < 1$; $0.67 < K_G < 0.90$). Una distribución con la misma curtosis que la curva de la distribución normal es llamada "mesocúrtica" ($K_G \approx 1$; $0.90 < K_G < 1.11$). Podemos interpretar la curtosis, como que tan separados o cercanos están los valores de Mz con respecto a la media en el eje vertical. Cuando el valor de la curtosis se encuentra fuera de los rangos anteriores, éstas se clasifican en muy platicúrticas ($K_G < 0.67$), muy leptocúrticas ($1.50 < K_G < 3.00$) y extremadamente leptocúrticas ($K_G > 3.00$). De esta forma la curtosis nos indica la probabilidad de ocurrencia de un Mz entre un rango de valores. En una distribución platicúrtica, la probabilidad de ocurrencia del Mz medio es mayor que en una leptocúrtica (Folk, 1971).

PETROLOGÍA DE ARENAS

En cuanto a la composición petrológica de las dunas podemos encontrar entre ellas, dunas con sedimento tanto heterogéneo como homogéneo. Por su origen, el sedimento se clasifica en aluvial, volcánico, metamórfico, sedimentario o biógeno. Dado que la composición de la arena de las dunas esta en función de los procesos y del tipo de roca fuente, las dunas presentan una composición petrológica distinta en cada región. Los cambios en la composición pétreo nos indican los procesos imperantes en la zona de estudio. Con las observaciones del microscopio y los diagramas ternarios, inferimos la procedencia de las dunas, identificando los procesos que imperan en la composición de las arenas.

La petrología estudia la composición de las rocas en cuanto a su origen sedimentario, metamórfico o ígneo. La costra continental superior esta constituida por cuarzo 20%, plagioclasas 35% (sódicas y de calcio), feldespatos de potasio 11%, vidrio volcánico 12%, biotita 8%, moscovita 5% y otros minerales en menor cantidad (Nesbitt et al., 1984). Mediante el análisis modal petrográfico podemos discriminar de forma visual los diferentes modos detríticos presentes en las arenas de las dunas (Weltje, 2002). Los modos detríticos que se discriminan en el análisis modal son los cuarzos (cuarzos monocristalinos, cuarzos policristalinos), los feldespatos, líticos (sedimentarios, volcánicos, metamórficos y plutónicos) y los accesorios (micas, minerales pesados, carbonatos) (Honda & Shimizu, 1998).

De acuerdo con la composición petrográfica modal y con base en el porcentaje normalizado al 100% de cuarzo total, feldespatos totales y líticos totales contenidos en las muestras, podemos clasificar las arenas en litarenitas, feldesarenitas, arenas cuarcíticas, feldesarenitas enriquecidas de cuarzo, etc...(Kasper-Zubillaga et al., 1999).

Utilizando diagramas ternarios, podemos observar gráficamente la composición petrográfica de las arenas; así como su dispersión y las tendencias de éstas hacia los tres polos graficados. Con los polígonos de la desviación estándar graficados alrededor de la media observamos la tendencia de la dirección de dicha dispersión.

Sin embargo, en lugar de dichos polígonos, muchas interpretaciones petrográficas se basan en el uso de elipses (regiones logísticas de límites de confianza) que están delimitadas en función de los límites de confianza. Estos son cuantitativamente más significativos que los polígonos de la desviación estándar (Weltje, 2002; Le Pera & Arribas, 2004; Vezzoli et al., 2004). Estas elipses están graficadas alrededor de la media en función de una región de probabilidad, a diferencia de los polígonos que están graficados alrededor de la media en función de la desviación estándar y no son rigurosos desde el punto de vista estadístico.

CUARZO

Los cuarzos son silicatos (minerales con radical SiO_4 , tetraóxido de sílice), tienen una dureza de 7, gravedad específica 2.65 gr/cm^3 y son químicamente estables. Son abundantes en rocas plutónicas tanto sedimentarias como volcánicas y metamórficas (Folk, 1971). No presenta planos de clivaje, por lo cual no se fractura fácilmente. En general el cuarzo monocristalino puede definirse como redondeado a anguloso con extinción directa a ondulante al rotar la platina (Basu et al., 1975; Pye & Mazzullo, 1984). El cuarzo con inclusiones (biotita, zirconio y / o rutilio) indica un origen plutónico / metamórfico. El cuarzo policristalino (> 2 cristales) puede definirse como granos con perímetros irregulares de origen metamórfico, sedimentario y granítico (Folk, 1971) en contacto directo entre los ángulos ($\sim 120^\circ$). Los cuarzos se extinguen al girar la platina, su color predominante es claro. Los cuarzos monocristalinos se extinguen completamente y proceden de fuentes graníticas o graneodoritas, además presentan un clivaje. Los cuarzos policristalinos se extinguen en forma irregular, observándose varios patrones de extinción al girar la platina en un mismo grano.

FELDESPATOS

Los feldespatos son silicatos ricos en sodio y calcio (plagioclasas); y en potasio (feldespatos de potasio). Se encuentran en la mayoría de los materiales de la corteza terrestre. Los feldespatos son formaciones prismáticas. Su color es variado, las plagioclasas presentan

colores blanco a gris y los feldespatos presentan colores blanco a rosa. Ambos, presentan un clivaje y un maclado al girar la patina. Las plagioclasa presentan un brillo vidrioso. Algunos feldespatos presentan textura pertítica. Los plagioclasas de sodio y calcio son más inestables químicamente que los feldespatos de potasio.

LITICOS

Los líticos sedimentarios se caracterizan por presentar una matriz con inclusiones de fragmentos de roca más pequeños. El pedernal sedimentario incluyendo el de grado fino y el limoso se incluyen en esta clasificación. En los líticos plutónicos se observan partículas de cuarzo grandes unidas formando una sola matriz. En los líticos metamórficos se observan deformados los granos en sentido semilongitudinal en forma de láminas amorfas. Los líticos volcánicos presentan espículas dentro de una matriz máfica generalmente. Al girar la platina los líticos se extinguen de forma completa y no presentan clivaje ni maclado.

GEOQUÍMICA DE ELEMENTOS MAYORES

La geoquímica se encarga del estudio de la composición química de los materiales presentes en la corteza terrestre, manto y núcleo de la tierra. Es una herramienta fundamental en el estudio de la procedencia de los sedimentos, tanto antiguos como recientes. La geoquímica es útil en tanto que las relaciones de balanza de masas entre la roca fuente y los diferentes grados producidos pueden ser estimados semicuantitativamente. Con la composición química podemos inferir los procesos de petrogénesis de los sedimentos (Nesbitt & Young, 1996; Honda & Shimizu, 1998, Kasper-Zubillaga et al., 1999; Carranza-Edwards et al., 2001; Yang et al., 2003; Honda et al., 2004). Con la composición química podemos establecer el grado de intemperismo químico del sedimento (Nesbitt & Young, 1982; Honda & Shimizu, 1998). Con la variación en la composición química de distintas estaciones, podemos establecer diferencias entre ellas. Con apoyo de la granulometría y la petrología, la geoquímica sirve para interpretar los procesos de formación, transporte y depositación del sedimento.

Actualmente se utilizan diferentes metodologías basadas en la espectrometría de masas para caracterizar químicamente los sedimentos. Estos análisis arrojan resultados semicuantitativos, ya que miden de forma indirecta el contenido de los elementos que se analizan. Dentro de los elementos que se identifican en estos análisis tenemos los denominados elementos mayores. El método utilizado para determinar la composición de elementos mayores en los sedimentos, depende del elemento a analizar, su concentración en la muestra y de la precisión requerida en los resultados.

Así por ejemplo, la composición de TiO_2 , Fe_2O_3 y MgO esta asociada con la procedencia de fuentes volcánicas. La composición de MnO esta asociada a una procedencia con fuente volcánica hidrotermal. Un alto contenido de sílice nos indica que la arena presenta un grado alto de madurez derivado de los procesos de intemperismo que han ocurrido en las arenas de las dunas. Por otro lado el aluminio también nos da un indicador de dichos procesos de intemperismo. El calcio, el sodio y el potasio generalmente son removidos por las soluciones agresivas del suelo, de tal forma a que la producción de alumina contra álcalis incrementa típicamente en el producto intemperizado (Nesbitt & Young, 1982).

El índice de alteración química (*CIA* por sus siglas en inglés) sirve para establecer el grado de intemperismo químico en los sedimentos (Nesbitt & Young, 1996; Honda & Shimizu, 1998). La forma de calcular este índice es de acuerdo a la siguiente ecuación, basada en concentraciones molares normalizadas al 100% :

$$\text{CIA} = [\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})] \times 100$$

Dentro de esta ecuación se considera el contenido de CaO en relación al contenido de Na_2O debido a que esta relación varía de acuerdo al tipo de sedimento. Por lo cual los estudios previos realizados en la corteza continental superior (Honda et al., 2004) se sabe que la relación de CaO con Na_2O es 1:3 en los feldespatos. Al conocer la composición química de las dunas podremos estimar el grado de intemperización química de las arenas de las estaciones muestreadas mediante el cálculo del CIA. Con estos valores comparare el grado de intemperización entre las estaciones para establecer diferencias y similitudes en cuanto al intemperismo químico que se presenta en cada estación.

iii. ANTECEDENTES

La variación regional en la composición sedimentológica, petrográfica y geoquímica de las dunas de arena del desierto y costeras ha sido reportada en diversos estudios (Bagnold, 1941; Folk, 1971; Lancaster, 1988; Honda & Shimizu, 1998, Livingstone et al. 1999; Kasper-Zubillaga & Dickinson, 2001; Wang et al., 2003; Muhs et al., 2003; Honda et al., 2004).

Bagnold (1941) propone los conceptos fundamentales de la física de la arena transportada atmosféricamente y de la formación de dunas del desierto.

Folk (1971) analizó campos de dunas longitudinales en el Desierto Simpson, en el Territorio Norte en Australia, demostrando variaciones significativas del tamaño de grano en los perfiles transversales de las dunas.

Lancaster (1988) analizó dunas en Namibia, África, y encontró que en función del tamaño de grano el proceso de transporte del viento era selectivo y que producía la acumulación de granos gruesos en la base de las dunas.

Honda & Shimizu (1998) analizaron sedimentos del desierto del Taklimakan, China, en cuanto a su composición sedimentológica, mineralógica y geoquímica, encontrando una homogeneidad de la composición química del sedimento debido probablemente a la influencia del proceso glacial, superior al proceso eólico.

Livingstone et al. (1999) analizaron dunas del SW del Kalahari, Sudáfrica, reportando las variaciones del tamaño de grano, no encontrando patrones en dicha variación; y que el sedimento de las crestas era mejor clasificado que el de las bases.

Kasper-Zubillaga & Dickinson (2001) compararon arenas del Golfo de México y arenas de las costas Foxton y Kapiti en Nueva Zelanda, para establecer un criterio de discriminación entre ambientes y subambientes deposicionales, de acuerdo a las diferencias composicionales de los ambientes y subambientes, y del grado en que estas diferencias varían en relación con los tipos de roca presentes en el terreno fuente.

Wang et al. (2003), estudiaron la región central del Taklimakan, China, encontrando una de las arenas más finas a nivel global por el tamaño de grano presentado (2ϕ a $4\phi = 0.25$ mm a 0.063 mm); propusieron que inicialmente las dunas se formaron con tamaños de grano homogéneos y que durante el desarrollo de la duna la clasificación de la arena cambió de acuerdo a los vientos, la escala de tiempo y el sedimento subyacente.

Muhs et al. (2003), establece las rutas de transporte eólico de arena en el SW de E.U.A, destacando la importancia del Río Colorado y las fuentes locales en estos procesos. Honda et al. (2004) analizó sedimento de dunas de los desiertos chinos del Taklimakan en la región NW, Tenger y Mus en el Norte Centro y la región de Naiman en el NE, encontrando variaciones regionales latitudinales en el sedimento del desierto; establecieron la procedencia del sedimento del desierto en función del patrón de transporte de polvo que ocurre sobre el este de Asia.

Algunos de estos estudios se han basado en la distribución granulométrica, el análisis modal petrográfico y los análisis químicos de elementos mayores para determinar los cambios en la composición del sedimento y poder inferir las implicaciones de su procedencia (Honda & Shimizu; 1998; Blount & Lancaster, 1990; Honda *et al.*, 2004). Honda & Shimizu (1998) analizaron en China sedimentos del cuaternario en cuanto a la composición de elementos mayores, composición mineral

y distribución de tamaño de grano encontrando la influencia de dos procesos en la homogenización de los granos : la erosión glacial y la actividad eólica.

Blount & Lancaster (1990) analizaron dunas, caracterizando su morfología, granulometría, mineralogía y color; determinaron su evolución desde el Pleistoceno temprano a medio hasta el Cuaternario y establecieron la procedencia en el Cañón del Colorado, el valle del Río Colorado y la costa sur de Sonora. Honda et al. (2004), analizaron en China sedimentos encontrando que la variación de calcita es intrínseca independientemente de su origen detrítico o autógeno, las variaciones regionales del CaO indican distintas procedencias del sedimento.

El área de estudio propuesta ha sido estudiada en términos de tamaño de grano y composición petrográfica para determinar las implicaciones de procedencia de las dunas en estudio (Merriam, 1969; Blount & Lancaster, 1990, Solís-Limón, 2003).

Merriam (1969) definió que los sedimentos fluviales y deltaicos son una fuente potencial de sedimento del mar de arena del Gran Desierto de Sonora.

Blount & Lancaster (1990) encontraron tres poblaciones principales de dunas en función de datos espectrales y las características texturales y mineralógicas; estimaron que los sedimentos eólicos más antiguos datan del Pleistoceno; determinaron su procedencia y definieron que los patrones espacial y temporal han sido definidos por los cambios climáticos y tectónicos del Cuaternario. En su tesis Solís-Limón (2003) concluye que el sedimento de las dunas del Pinacate tiene sus fuentes en la Sierra Blanca en E.U.A. y el complejo del Pinacate en función del régimen de vientos dominantes.

iv. OBJETIVO

Esta tesis se enfoca en determinar las implicaciones de procedencia de las dunas del desierto y costeras del estado de Sonora, México; para ello integra en el análisis las características de la distribución de tamaño de grano, el análisis modal petrográfico y la composición química de elementos mayores del sedimento. Las conclusiones presentadas en esta tesis son sustentadas con argumentos sedimentológicos, petrográficos y geoquímicos basados en análisis cuantitativos para datos composicionales y geoquímicos y estadística paramétrica. Los alcances de esta tesis son los siguientes :

- Determinar las características de la distribución granulométrica, la composición petrológica y la composición química de elementos mayores de las dunas de arena del desierto y costeras del estado de Sonora, México.

- Realizar un análisis de procedencia de las dunas, con base en el estado composicional del sedimento; identificando los mecanismos, las fuentes del sedimento, así como su influencia relativa.

v. HIPÓTESIS

- ¿Qué mecanismos físicos : marinos, eólicos y fluviales dominan en la distribución granulométrica y en la composición petrológica de las dunas?
- ¿Cuál es la composición petrológica total de las dunas desérticas en una zona con roca plutónica (granítica) traslapada con fuente de roca volcánica y en la costa?
- De acuerdo al clima seco predominante del área, ¿Qué localidades son más ricas en minerales y más estables químicamente?
- ¿Qué factores influyen en el intemperismo físico y químico de las dunas en cada localidad muestreada?

vi. JUSTIFICACIÓN

Por primera vez se reporta la composición química de elementos mayores de las dunas de arena del estado de Sonora, México. No existen estudios sobre semejanzas y diferencias composicionales granulométricas, petrológicas y químicas en dunas desérticas y costeras dentro de una misma zona climática en México. Esta investigación constituye la primera en su tipo dentro de la UNAM y en el ICMYL, la cual fue desarrollada por investigadores mexicanos de la UNAM en su totalidad. Ésta investigación amplía el conocimiento sobre la procedencia de las dunas desérticas y costeras pertenecientes a la zona de estudio; y constituye una base de datos sedimentológicos de las dunas.

Con base en los datos obtenidos en este estudio se pueden realizar investigaciones más detalladas, como por ejemplo : elementos traza y tierras raras, para determinar génesis de las dunas; magnetismo, para establecer variaciones en la susceptibilidad magnética para estudios de recursos minerales potencialmente explotables, caracterización biogeoquímica de las arenas calcáreas de Puerto Peñasco para identificar fuentes de hidrocarburos y la integración de un sistema de información geográfica para el estudio y monitoreo de las dunas en estudio para conocer su dinámica.

Los resultados obtenidos en la presente investigación forman parte de los estudios preliminares del área de estudio, indispensables para planear proyectos sustentables desde el punto de vista ambiental y ecológico. Este estudio puede integrarse con otros estudios de los demás campos del conocimiento, para el desarrollo de proyectos multidisciplinarios e interdisciplinarios.

IMPORTANCIA DEL PRESENTE ESTUDIO EN LA INGENIERÍA CIVIL

El presente estudio identifica el impacto ambiental sedimentológico causado en las dunas por la actividad humana, en específico por el desarrollo de obras hidráulicas. Debido al represamiento del Río Colorado (e.g. presa Hoover en E.U.A. y presa Morelos en México) a lo largo de su cauce.

Estas obras hidráulicas almacenan y aprovechan las descargas del Río Colorado en su totalidad (Carriquiry et al., 2001), de esta forma interrumpen el aporte de sedimento del río a la cuenca y el delta de la zona de estudio; modificando la composición de las dunas.

Mediante este estudio podemos inferir el tipo de procesos físicos que imperan en la región. Con ello podemos diseñar obras de infraestructura que consideren en su análisis y diseño estructural las solicitaciones debidas a los procesos costeros y desérticos de la zona de estudio, referentes a la formación, transporte y depositación de sedimento eólico.

Por otra parte, tiene aplicación en la planeación del uso del suelo. Al conocer los patrones de transporte del sedimento, podemos establecer usos del suelo en función de la acumulación de sedimento, la migración y el crecimiento de las dunas.

La granulometría, la mineralogía y la geoquímica nos indican fuentes de recursos pétreos para la construcción, así como las características mecánicas del suelo.

En esta tesis, se identifica y describe el paisaje de las dunas. El paisaje de las dunas no puede ser modificado arbitrariamente por la actividad del Ingeniero Civil. El paisaje de las dunas se considera un servicio ambiental y juega un papel muy importante en las políticas de protección y conservación de las áreas naturales mexicanas (LEGEPA, 1990).

Los conocimientos de granulometría, petrología y geoquímica de elementos mayores complementan y amplían la formación del Ingeniero Civil en el área de la Geología y específicamente en la Mecánica de Suelos.

La elaboración de esta tesis despertó, fomentó y motivó en mi formación humana y profesional como Ingeniero Civil el desarrollo de la investigación científica.

I. ÁREA DE ESTUDIO

I.I. DESIERTO DE ALTAR, MÉXICO

El desierto de Altar en el NW de México cubre una superficie de 5700 Km² (Blount & Lancaster, 1990), el área representa un laboratorio natural para la investigación de dunas del desierto y de la costa dentro de una misma zona de estudio (Lancaster, 1988, 1989, 1990, 1992, 1995).

I.II. RASGOS GENERALES

El estado de Sonora, México, limita al norte con la frontera con los Estados Unidos de Norte América, al sur con el estado de Sinaloa, al este con el estado de Chihuahua y al oeste con el estado de Baja California y el Golfo de California. Se localiza entre las coordenadas 31^o, 32^o 25'N; 113^o85', 115^o W. El área de estudio se encuentra localizada dentro del mar de arena del Gran Desierto de Altar también conocido como Gran Desierto de Sonora que a su vez es parte del Gran Desierto Americano el cual se extiende desde el Norte de los Estados Unidos hasta México (Blount & Lancaster, 1990) . El desierto de Altar esta clasificado también como un desierto cálido-costero. Los desiertos costeros generalmente se encuentran en las márgenes *W* de los continentes cerca de los trópicos de Cáncer y Capricornio. Son afectados por las corrientes frías del océano paralelas a la costa. Dado que el sistema local de vientos domina la transferencia de vientos, estos desiertos son menos estables que los demás. La neblina invernal, producida por las corrientes frías ascendentes , frecuentemente cubre los desiertos costeros y bloquea la radiación solar. Los desiertos costeros son relativamente complejos, por estar ubicados en una zona de transición entre los sistemas terrestre , oceánico y atmosférico. Así mismo, la zona de estudio es adyacente a la región fisiográfica denominada Alto Golfo de California (Carriquiry et al., 2001). El clima predominante en esta región es seco. Con precipitaciones medias anuales menores a 10 cm. El 60% al 80% de la precipitación ocurre de Julio a Septiembre (Stensrud et al., 1997). Cerca de la costa domina un sistema de brisa marina (Álvarez-Borrogo, 1983).

Se identifican dentro del área de estudio los Ríos Colorado y Sonoyta como las principales corrientes superficiales de agua en tierra. Las descargas del Río Colorado son mínimas en la actualidad, pero a lo largo de las eras geológicas precedentes aportó grandes cantidades de sedimento procedentes del Cañón del Colorado mediante sus fuertes descargas, mismas que dieron formación al delta del río (Carriquiry et al., 2001). El Río Sonoyta presenta descargas intermitentes a lo largo del año durante la temporada de lluvias. El Río Sonoyta se forma a partir de las corrientes que nacen en la cuenca del Pinacate al S de la zona de estudio (Carriquiry et al., 2001). Este río es el único que aporta sedimentos al mar actualmente al norte del Golfo de California en Sonora. La situación anterior ha provocado que el sedimento en las costa sea controlado por el aporte de arenas procedentes del desierto más que por los ríos mencionados y el Golfo de California. El efecto que se ha producido por la entrada de sedimento del Desierto es la formación de un depósito reciente en el fondo del Alto Golfo de California (Carriquiry et al., 2001).

El mar del Golfo de California limita la zona de estudio, sobre todo lo largo de la costa del estado de Sonora. El Golfo de California es una cuenca rectangular estrecha con una longitud de 1500 Km el cual conforma un mar epicontinental de origen tectónico (Lonsdale, 1989). Las Islas Midriff (Ángel de la Guarda y Tiburón) forman un umbral que separan el golfo de California en dos provincias fisiográficas El Golfo Norte y el Golfo Sur Centro. El Golfo Norte o Alto Golfo como también se le conoce es de aguas bajas, entre los 200 m, con excepción de las cuencas Delfín, Salsipuedes y Tiburón (Carriquiry et al., 2001) . El régimen de corrientes del Mar de Cortés como también se le conoce, influye en la composición de la arena de las dunas. Las corrientes superficiales y profundas en el Norte del Golfo de California están inducidas por las mareas, vientos, gradientes de densidad y la geostrofia. Las corrientes marinas, inducidas por el cambio de marea en la región comprendida entre el Alto Golfo y las Islas Midriff, son una componente particularmente importante. En la zona comprendida por el Alto Golfo de California y de descarga del Río Colorado, las mareas semidiurnas alcanzan los 10 m de amplitud, que inducen corrientes con velocidades de desde 1.5 m/s a 3.0 m/s. En el área de las Islas Midriff pueden observarse corrientes de hasta 2 m/s. A nivel regional, las corrientes residuales producidas por el viento (6 cm/s) presentan dos sistema de corrientes opuestas. Los vientos dominantes del *NW* inducen una circulación en el sentido de las manecillas del reloj, mientras que los vientos de *SE* inducen una corriente en contra de las manecillas del reloj.

El exceso de evaporación y/o el enfriamiento de las aguas superficiales del Alto Golfo de California, inducen corrientes de gravedad de 10 cm/s. La masa de agua resultante fluye al sur a lo largo de las márgenes de Baja California, hacia las profundidades de las cuencas de la región norte del Golfo de California. Este flujo es compensado por un flujo superficial con dirección *norte* compuesto de agua menos densa y menos salada, procedente de la región centro del Golfo de California. Corrientes termohalinas superficiales y subsuperficiales en el Norte del Golfo de California muestran dos patrones circulatorios. Un giro ciclónico con centro en la cuenca Delfín (con velocidades de hasta 40 cm/s); y un giro inverso anticiclónico en invierno (Carriquiry et al., 2001)

El viento dominante en el mes de noviembre en la estación de San Luis Río Colorado es en la dirección *NW* (Pérez-Villegas, 1990), mientras que en la estación de Puerto Peñasco la dirección del viento dominante es *SW* (Pérez-Villegas, 1990). Los datos de vientos de Yuma, Arizona, ubicada 50 km al *NW* del área de estudio tienen tres direcciones principales: en invierno, el viento procede del *N*, en primavera del *W*, y en verano procede del *S* (Blount & Lancaster, 1990). Cada régimen genera del 25% al 30% del transporte de arena potencial anual. El porcentaje de vientos del *N* decrece de *NW* a *SE*, en donde el porcentaje de vientos del *S* aumenta (Blount & Lancaster, 1990). Por otro lado, de acuerdo con Álvarez-Borrego (1983), los vientos de *NW* prevalecen de noviembre a mayo en el Alto Golfo de California; durante el resto del año los vientos soplan del *SW* (Álvarez-Borrego, 1983).

La variación de la composición de las dunas entre las distintas localidades depende del grado de influencia que cada entrada de sedimento tiene en el proceso de formación de las dunas, así como del tipo de roca fuente del sedimento y de los procesos de intemperismo.

I.III. GEOLOGÍA

El mar de arena del Desierto De Altar es adyacente a la cuenca subductiva Salton Trough y a la zona de falla de Cerro Prieto, una extensión del sistema de fallas San Jacinto. La región del Delta se ha deformado desde hace 5.5. m.a., fenómeno asociado con la apertura del Golfo de California (Winkler & Kidwell, 1986). Esta deformación resultó en una migración al *W* del Río Colorado durante el Plioceno y Pleistoceno (Ingle, 1982). El valle del Río Colorado es árido y parece haber sido desierto por bastante tiempo durante la era del Cuaternario, indicado por la evidencia paleobotánica (van Devender et al., 1987). Las unidades litológicas presentes alrededor del Alto Golfo de California son batolitos del Cretáceo, rocas volcánicas y

pyroclásticas de la Formación Comondú así como suelos del Cuaternario (Allison, 1964; Ortlieb, 1991). Los tipos de roca que encontramos en el área de estudio así como los códigos que utilizamos para denominarlas son los siguientes. Unidades volcánicas y sedimentarias : Qba = rocas volcánicas (andesitas y basaltos) (Cuaternario); Tv = rocas continentales volcánicas (Mesozoico); Jivs = sedimentos volcánicos (Jurásico); Csc = sedimentos continentales (Cenozoicos); Ps = sedimentos marinos (Paleozoico Superior); Qc = sedimentos continentales (Cuaternario); D = dunas de arena. Unidades metamórficas y plutónicas : Ptimet = rocas metamórficas (Proterozoico); Trmet= rocas metamórficas (Triásico); PgKsgr= rocas graníticas (Cretaceo Superior a Cenozoico Temprano) ; Pg= rocas graníticas (Cretaceo Superior); Jgr = granitos (Jurásico)

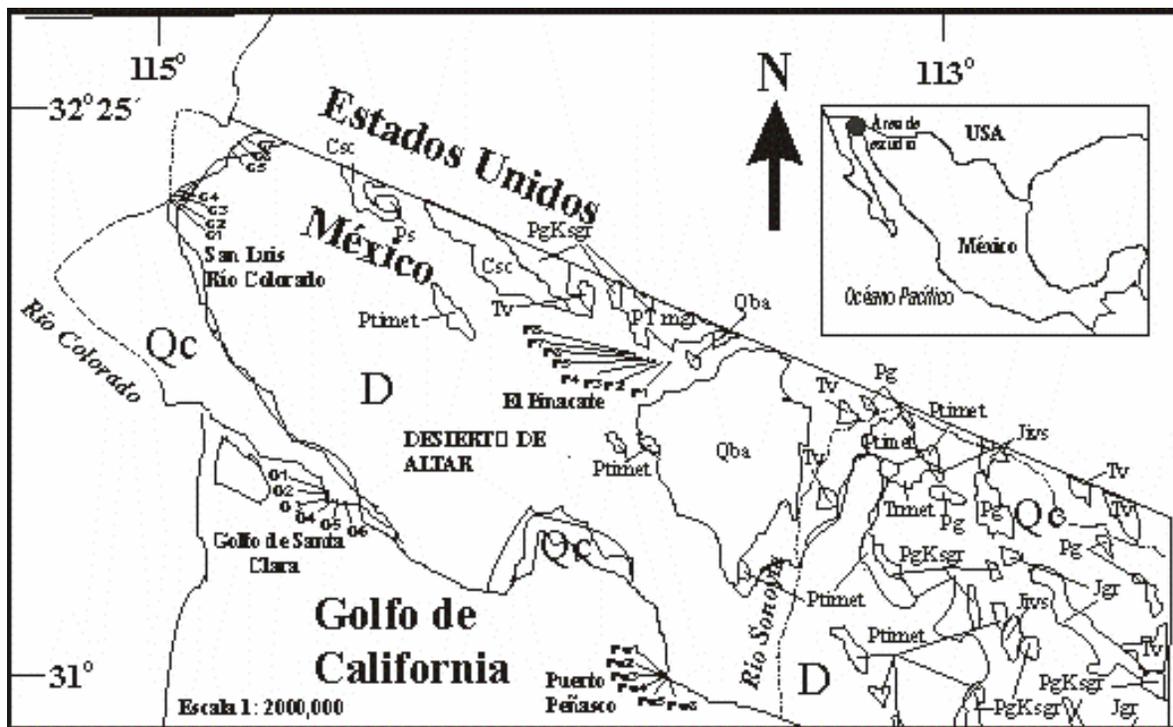


FIGURA 1Y2 .CARTA GEOLÓGICA DEL ÁREA DE ESTUDIO Y ZONAS DE MUESTREO

I.IV. SEDIMENTOS Y MORFOLOGÍA DE LAS DUNAS

Existen dos grandes áreas de dunas en el desierto (Lancaster et al., 1987), un grupo del *E* integrado por dunas crecientes (parabólicas) compuestas y complejas de 10 a 80 m de altura y un área al *W* integrada por cadenas y asociaciones de dunas estrella de 80 a 150 m de altura, rodeadas de dunas parabólicas y reversibles de 10 a 20 m de altura. Las dunas reversible son las dunas en estrella. Además existen áreas de dunas parabólicas degradadas

por la acción del fenómeno de migración de 5 a 10 m de altura ubicadas en las márgenes de las dunas de estrella en algunas áreas interdunares entre las cadenas de dunas en estrella. Extensiones de arena, dunas lineales y pequeñas áreas de dunas parabólicas activas al *W* y al *NW* del Desierto se extienden hasta el valle del Río Colorado. Las dunas en estrellas del *W* y las parabólicas del *E* están separadas por una extensión de arena ondulante cubierta de vegetación y pequeñas áreas de dunas activas parabólicas.

I.V. METODOLOGÍA DE CAMPO

El levantamiento de las muestras fue realizado en cuatro localidades de la zona de estudio : San Luis Río Colorado, El Pinacate, Golfo de Santa Clara y Puerto Peñasco (Figura 1). El muestreo fue realizado durante el mes de noviembre del 2002. Las dunas muestreadas, existentes en estas localidades, son del tipo lineal y del tipo crecientes. En total se colectaron 54 muestras de arena procedentes de 27 estaciones (Figura 2). La colecta de muestras consistió en tomar arena fresca de la capa de suelo comprendida entre la superficie y el primer centímetro de profundidad (aprox. 40 g) para evitar el efecto de heterogeneidad de sedimento a profundidad. Se levantaron muestras de las crestas y de los flancos para guardarlas en bolsas de polietileno de 10 x 6 cm.

II. METODOLOGÍA DE LABORATORIO Y GABINETE

II.I. GRANULOMETRÍA

Los análisis de los parámetros granulométricos se realizaron con un analizador láser Coulter Counter. El analizador determina los parámetros de tamaño de grano (Mz), clasificación (σ), asimetría (Ski) y curtosis (K_G). Su fundamento consiste en medir el tamaño de las partículas por difracción del haz de luz láser. La luz de un haz láser es usada como analizador y todas las partículas que lo atraviesan difractan la luz. La muestra debe de estar en el rango de tamaño de partículas de -1.0ϕ a 14.6ϕ (Livingstone et al., 1987). El análisis se realiza de dos a tres repeticiones o más por muestra, dependiendo de la homogeneidad de la muestra. La información es llevada a una computadora y transforma la información detectada en una gráfica (% de volumen de muestra vs. diámetro de partículas) y produce el listado de todos los parámetros relativos a la distribución de tamaño de grano registrados. En total se analizaron 54 muestras de arena.

II.II. PETROLOGÍA

Se realizó la determinación de la composición petrológica de las dunas costeras y desérticas en estudio mediante el análisis modal petrográfico con un microscopio de luz polarizada Carl Zeiss con objetivo 10x. Se utilizó el método de conteo estándar con 200 granos por lámina (Rooney & Basu, 1994), el cual considera a los líticos como partículas independientes aún cuando existan macrocristales. Las componentes incluidas fueron : cuarzo total (C_T), dividido en cuarzo monocristalino (C_m) y cuarzo policristalino (C_p); feldespatos totales (F_T) (plagioclasa Ca-Na y feldespato de potasio); líticos totales (L_T), divididos en líticos volcánicos (L_v), líticos sedimentarios (L_s), líticos metamórficos (L_m) y líticos plutónicos (L_p) y finamente en accesorios (Acc) (otros minerales y detritus biógenos : fragmentos de conchas y corales).

Se utilizaron diagramas ternarios para las interpretaciones petrológicas normalizadas al 100%. En el primer caso se graficaron los polos correspondientes a cuarzos totales, feldespatos totales y líticos totales con polígonos que representan desviaciones estándar. En el segundo caso se graficaron los polos correspondientes a los líticos sedimentarios, líticos volcánicos y líticos plutónicos y metamórficos. En otros diagramas similares, se aplicó el método logístico con límites de confianza al 90 % (Weltje, 2002).

Los datos de entrada en el algoritmo del método logístico con límites logísticos son los valores normalizados referentes a cada polo. El algoritmo realiza las transformaciones logarítmicas, calcula la matriz de covarianza así como los eigenvalores y los eigenvectores asociados a dicha matriz. Calcula la media aritmética y la media geométrica. Los datos de salida son los puntos que definen la región elíptica; los resultados se presentan de dos formas : a) en función de las transformaciones logarítmicas, en un espacio bivariado; y b) en el espacio composicional, en función de los tres polos. En cada forma, los resultados se presentan en tres grupos de acuerdo a tres límites de confianza diferentes (99%, 95%, 90%). Los dos métodos se utilizaron para establecer una diferencia entre ambos y discutir las ventajas y desventajas de ambas metodologías.

II.III. GEOQUÍMICA

La composición química de elementos mayores (óxidos mayores) se determinó mediante el método de la fluorescencia de rayos X utilizando un equipo Siemens SRS 3000.

Las muestras se molieron para obtener tamaños de grano entre 1µm y 10µm. Posteriormente se realizó el análisis en discos de fusión (Norrish & Hutton, 1969; Norrish & Chappell, 1977).

Se analizaron en total 22 muestras de arena de las dunas. Los elementos analizados fueron: sílice SiO₂, titanio TiO₂, hierro Fe₂O₃, magnesio MgO, manganeso MnO, aluminio Al₂O₃, sodio Na₂O, potasio K₂O, calcio CaO y fósforo P₂O₅ (Taylor & McLennan, 1985; Kasper-Zubillaga et al., 1999; Carranza-Edwards et al., 2001). La composición de estos elementos se reporta en porcentaje y se reporta también una pérdida de masa por calcinación.

Se presentan dos diagramas ternarios en donde se establecen los polos de la composición geoquímica SiO₂ : Al₂O₃ + Na₂O + K₂O : Fe₂O₃ + TiO₂ + MgO . En los diagramas se graficaron los polígonos de la desviación estándar por un lado, así como las elipses de Weltje (2002) por el otro. A partir de los resultados de geoquímica se calculó el índice de alteración química $CIA = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)] \times 100$ (Nesbitt & Young, 1982). Para el cálculo de este índice se consideró el porcentaje de CaO a partir de la concentración de Na₂O, en una relación Ca:Na = 1:3 (Honda & Shimizu, 1998). Esto se realizó base en la relación de masa entre el Na y el Ca presente en las plagioclasas, según la composición estimada para la corteza continental superior (Honda & Shimizu, 1998).

II.IV. ESTADÍSTICA PARAMÉTRICA DE DATOS SEDIMENTOLÓGICOS

Se realizaron pruebas de normalidad Kolmogorov-Smirnov a las series de datos del análisis granulométrico (Mz, σ , Ski, K_G) y del análisis modal petrográfico (C_T, F_T, L_T). Una vez comprobada la normalidad de las distribuciones de los datos, necesaria para elaborar análisis multivariados estadísticos paramétricos se realizó una transformación logarítmica de los resultados del análisis modal petrográfico para obtener rangos de datos abiertos de la siguiente forma : $\log C_T / F_T$, $\log F_T / L_T$ y $\log C_T / L_T$ (Aitchison, 1986; Weltje, 2002). Con los datos sedimentológicos y petrográficos se realizó un análisis de discriminación lineal y con los datos geoquímicos se realizó un análisis de conglomerado con el programa STATISTICA V.4.

La estadística paramétrica ha sido aplicada en estudios sedimentológicos ampliamente por varios autores (Wang et al., 2003; Kasper-Zubillaga et al., 1999; Roser & Korsh, 1986) con la finalidad de establecer interpretaciones sobre la procedencia de los sedimentos, con bases cuantitativas estadísticamente rigurosas. Las series de eventos utilizadas en la estadística paramétrica es conveniente que estén en forma de rangos de datos abiertos. Los rangos de

datos abiertos son más seguros, ya que con ellos evitamos la autocorrelación y la dependencia de dos variables (Aitchison, 1986).

El análisis discriminante sirve para conocer cuales son las variables sedimentológicas (variables canónicas) que mejor discriminan entre dos o más eventos y cuales son los grupos de dunas más diferentes entre sí. La distancia Mahalanobis es la distancia de la función discriminante lineal al centro de cada grupo de datos. Con esta distancia podemos conocer que grupo de dunas se aleja más de la función discriminante y cual es la variable sedimentológica que mejor discrimina a las arenas de las dunas. Con estos resultados y las interpretaciones geológicas, podemos inferir las implicaciones de procedencia con base cuantitativas.

En este estudio se incluyó un análisis de conglomerado (*Cluster* en inglés) (Tryon, 1939). El propósito del análisis de conglomerados es la de agrupar los datos sedimentológicos. De tal forma que los datos sean muy homogéneos dentro de dichos grupos (mínima distancia) y que estos grupos sean lo más heterogéneos posible entre ellos (máxima distancia). De este modo obtenemos una clasificación de datos en base a una variable a considerar. El análisis cluster incluye las variables geoquímicas, como lo son los óxidos mayores y el CIA.

III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

III.I. GRANULOMETRÍA

TAMAÑO DE GRANO

De acuerdo al tamaño de grano medio, podemos clasificar las arenas de las dunas de las estaciones de Golfo de Santa Clara y de Puerto Peñasco como arenas medias. Mientras que a las arenas de las dunas de las estaciones de San Luis Río Colorado y Pinacate se pueden clasificar como muy finas (Tabla 1).

Al comparar las muestras de las distintas estaciones de muestreo, observamos que las arenas de las dunas del Pinacate son las más finas, seguidas de arenas de las dunas de San Luis Río Colorado, a continuación las arenas de las dunas de Puerto Peñasco y finalmente las arenas de las dunas del Golfo de Santa Clara.

ORIGEN COMPOSICIONAL Y ALTERACIÓN QUÍMICA
EN DUNAS DEL DESIERTO Y COSTERAS DEL ESTADO DE SONORA, MÉXICO

TABLA 1. GRANULOMETRÍA

MUESTRA	Mz	σ	Ski	K _G
SAN LUIS RIO COLORADO				
C1f	2.064	0.856	0.125	1.121
C1c	2.528	1.609	0.491	1.828
C2f	1.96	1.002	0.491	1.828
C2c	2.046	0.845	0.307	1.280
C3f	2.147	1.046	0.307	1.280
C3c	1.947	0.881	0.335	0.892
C4f	2.09	0.934	0.191	1.060
C4c	2.024	0.951	0.191	0.920
C5f	2.114	1.152	0.335	1.136
C5c	1.963	1.133	0.391	1.202
C6f	2.061	0.777	0.196	1.057
C6c	1.88	0.895	0.155	1.140
C7f	1.972	0.655	0.178	1.059
C7c	2.125	0.689	0.122	1.051
Media	2.066	0.959	0.273	1.204
SIERRA DEL PINACATE				
P1f	2.562	0.449	0.057	1.046
P1C	2.498	0.403	0.074	1.026
P2f	2.617	0.393	0.052	0.995
P2c	2.651	0.368	0.040	0.967
P3f	2.517	0.490	0.040	1.040
P3c	2.464	0.382	0.054	0.981
P4f	2.602	0.380	0.054	0.986
P4C	2.677	0.385	0.059	0.982
P5c	2.712	0.423	0.074	1.022
P5f	2.547	0.386	0.043	0.977
P6f	2.630	0.429	0.058	1.028
P6c	2.543	0.436	-0.004	1.040
P7f	2.697	0.421	0.026	1.004
P7c	2.759	0.409	0.065	1.025
P8F	2.680	0.371	0.035	0.951
P8C	2.590	0.384	0.033	0.968
Media	2.609	0.407	0.048	1.002
GOLFO DE STA CLARA				
G1f	1.905	0.895	0.172	1.021
G1c	1.823	0.787	0.329	1.091
G2f	1.476	0.534	0.164	1.292
G2c	1.671	0.607	0.237	1.194
G3f	1.850	0.653	0.159	1.050
G3c	1.637	0.547	0.129	1.101
G4f	1.629	0.534	0.178	1.108
G4c	1.340	0.356	0.030	0.958
G5f	1.679	0.576	0.286	1.190
G5c	1.582	0.554	0.179	1.132
G6f	1.720	0.571	0.042	1.061
G6c	1.677	0.479	0.115	1.044
Media	1.666	0.591	0.168	1.103
PUERTO PEÑASCO				
Pe1f	1.602	0.732	-0.184	1.187
Pe1c	1.346	0.772	-0.206	1.035
Pe2f	1.477	0.702	-0.090	1.196
Pe2c	1.693	0.700	-0.051	1.246
Pe3f	1.793	0.977	-0.167	0.955
Pe3c	1.967	0.871	-0.320	1.194
Pe4f	1.876	0.741	-0.123	1.085
Pe4c	2.137	0.603	-0.121	1.190
Pe5f	2.031	0.616	-0.131	1.160
Pe5c	2.308	0.498	0.022	1.039
Pe6f	1.808	0.931	-0.208	1.060
Pe6c	1.900	0.946	-0.301	1.167
Media	1.828	0.757	-0.157	1.126

Se observa una disminución en el tamaño de grano entre las estaciones del W (San Luis Río Colorado y Golfo de Santa Clara) y del E (Puerto Peñasco y Pinacate) del área de estudio. También se observa una disminución del tamaño de grano entre las estaciones del S (Golfo de Santa Clara y Puerto Peñasco) y del N (San Luis Río Colorado y Pinacate). Lo que nos indica que existen granos más gruesos sobre la costa que tierra adentro. Y además que entre mas nos internamos en el continente desde la costa tenemos una composición mayor de granos finos. Esto sugiere que la selectividad del viento, la cual prefiere granos finos para el transporte, reforzado con la dirección dominante del viento durante el mes de noviembre (invierno), puede indicar que las arenas finas proceden del N del área de estudio. Al analizar el tamaño de grano de las estaciones del Golfo de Santa Clara, observamos que el Mz en el punto G1 es más fino que en los demás (Tabla 1). De la misma forma en Puerto Peñasco se observan puntos muestreados que presentan Mz más finos.

Es posible que parte del sedimento del Golfo de Santa Clara, que presentan valores similares de Mz a los de Puerto Peñasco, proceda de la misma fuente (Blount & Lancaster, 1990; Muhs, 2003). Adicionalmente el sedimento es resuspendido y arrastrado por el patrón de

dispersión de sedimento en el Delta del Río Colorado y del Alto Golfo de California combinado con la selectividad del viento.

Los procesos de transporte y depositación identificados pueden asociarse al tamaño de grano de las arenas. En el Pinacate, los granos presentes son los más finos, debido posiblemente a la selectividad del viento (Kasper-Zubillaga et al., 1999, Carranza-Edwards, 2001). Por otro lado en San Luis Río Colorado se observan granos más gruesos, lo que se debe posiblemente a la combinación de sedimento relicto del delta del Río Colorado con sedimento transportado por el viento del *NW*. Esto también puede estar vinculado a la cercanía de la roca fuente (delta del Colorado) que genera partículas más gruesas hacia las dunas.

En el Golfo de Santa Clara observamos granos más gruesos que en San Luis Río Colorado, lo que puede ser debido a una composición de sedimento procedente del delta del Río Colorado y del fondo marino del Alto Golfo de California. En esta localidad no se observan granos muy finos parecidos a los de las latitudes superiores. En Puerto Peñasco se observan granos de tamaño similar a los de el Golfo de Santa Clara. (rango 1.83-1.67 Φ respectivamente). La similitud de los granos gruesos de Puerto Peñasco con los del Golfo de Santa Clara puede ser debida a la entrada de sedimento procedente del fondo marino del Alto Golfo y de sedimento transportado por las corrientes marinas entre las dos localidades. Es probable que la composición de los sedimentos en Puerto Peñasco (carbonatos) estén generando arena de tamaño de grano medio en la duna.

De acuerdo con los datos de clasificación no se observa un patrón definido. De acuerdo al valor de clasificación podemos clasificar a las arenas del Pinacate en bien sorteadas, a las de Golfo de Santa Clara moderadamente bien sorteadas, a las de Puerto Peñasco y San Luis Río Colorado moderadamente sorteadas.

Diferentes mecanismos de transporte influyen en la clasificación, si el valor de la clasificación aumenta, el sedimento está más mal clasificado; entonces hay más granos de diferentes tamaños. Tanto Puerto Peñasco como San Luis Río Colorado presentan los valores más altos de clasificación ocasionado por la presencia de granos finos y gruesos.

Podemos observar la influencia del sedimento relicto transportado por el Río Colorado en San Luis Río Colorado y del sedimento transportados por el Río Sonoyta y las corrientes de la costa en Puerto Peñasco. Esto junto con el aporte de sedimento transportado por el viento

aumenta el valor de la clasificación. La clasificación en el Pinacate presenta el valor más bajo lo cual nos indica que las partículas son de tamaños similares. Al no existir entradas de sedimento en el Pinacate, por vía costera o fluvial, podemos inferir que el sedimento es transportado exclusivamente por el viento de manera selectiva y posiblemente recorriendo largas distancias. En el Golfo de Santa Clara observamos un valor bajo en la clasificación, sin embargo existe un aumento en la clasificación en la estación G1 parecido a la clasificación en San Luis Río Colorado, lo que posiblemente se deba al aporte de sedimento por la acción de vientos del norte. En los demás puntos del Golfo de Santa Clara existe una recirculación de sedimento debido al patrón de dispersión de sedimento en el Delta del Río Colorado y del Alto Golfo de California. De esta forma se presentan entonces dos patrones de transporte. El primero, un patrón de transporte por el viento en el continente y sobre la costa con dirección Sureste y un segundo otro patrón de transporte litoral con dirección Noroeste, junto con el aporte de sedimento del Río Sonoyta en Puerto Peñasco.

ASIMETRÍA

De acuerdo a los valores de asimetría podemos clasificar a las arenas de San Luis Río Colorado como asimétricamente finas, las de Pinacate como casi simétricas, las de Golfo de Santa Clara como asimétricamente finas y las de Puerto Peñasco asimétricamente gruesas (Tabla 1). De acuerdo a la asimetría y al tamaño de grano, las arenas finas no necesariamente son simétricamente finas (e.g. Golfo de Santa Clara vs Puerto Peñasco ó San Luis Río Colorado vs Pinacate).

En el Pinacate la simetría de las partículas puede deberse a la selectividad del viento, al transportar partículas de arena muy finas y más homogéneas de acuerdo al Mz. (Livingstone, 1989; Kasper-Zubillaga & Dickinson, 2001; Carranza-Edwards, 2001). En San Luis Río Colorado observamos una asimetría fina, debido a la selectividad del viento, con una influencia mayor de sedimento transportado del desierto (granos finos) que de sedimento transportado de la planicie del delta (granos gruesos).

En Puerto Peñasco se presentan valores negativos de asimetría (gruesos) mientras que en el Golfo de Santa Clara se presentan valores positivos (finos). Esto nos indica que la composición del Golfo de Santa Clara está dominada por sedimento bastante homogéneo probablemente procedente de las descargas del Río Colorado y que la composición de Puerto Peñasco está dominada por sedimento heterogéneo de acuerdo a su tamaño de grano. Es

posible que la asimetría negativa en Puerto Peñasco esté asociada a la acumulación de partículas carbonatadas en la duna.

CURTOSIS

San Luis Río Colorado ($K_G = 1.204$) y Puerto Peñasco ($K_G = 1.126$) muestran curvas leptocúrticas ($K_G > 1.11$) (Folk, 1971). El Pinacate ($K_G = 1.002$) y el Golfo de Santa Clara ($K_G = 1.103$) presentan distribuciones mesocúrticas ($K_G \approx 1$) (Folk, 1971) aproximándose a la curva de normalidad Gaussiana ($K_G = 1$).

Las curvas leptocúrticas tienden a interpretarse como distribuciones de colas cortas, con un mejor clasificación en el centro de las curvas en comparación con las colas. Por tanto la curtosis nos indica la clasificación a lo largo de la curva de distribución, además de la dispersión de los datos sobre el eje, lo que concuerda con los valores obtenidos en el clasificación (Folk, 1971).

En cuanto a los procesos, podemos decir que el sedimento del Pinacate y de Golfo de Santa Clara presentan una normalidad con respecto a su distribución granulométrica, el sedimento en estas dos localidades es homogéneo en cuanto al tamaño de grano. En el San Luis Río Colorado y en Puerto Peñasco existe una dispersión sobre el eje de la curva, en donde los valores se alejan más de la media disminuyendo la probabilidad de que ese valor ocurra; por tanto esto indica mas heterogeneidad del sedimento.

III.II. PETROLOGÍA

En el conteo puntual podemos observar que los cuarzos monocristalinos dominan la composición de cuarzos totales (Tabla 2). Los cuarzos policristalinos son mínimos dentro de las muestras. De acuerdo al contenido de cuarzos, podemos observar que las arenas de la localidad de Puerto Peñasco presentan la menor concentración. Esto posiblemente se deriva del origen plutónico del sedimento. Estos resultados pueden asociarse al tipo de roca madre.

El contenido de feldespatos se mantiene relativamente constante en las cuatro localidades (Tabla 2). Sin embargo el contenido de feldespatos es menor en las localidades de la costa, siendo el valor más bajo el de Puerto Peñasco, debido a la presencia de carbonatos marinos biógenos que compiten con los terrígenos en su totalidad.

El contenido de feldespatos esta asociado con los procesos de intemperismo químico y mecanismos de abrasión (McBride et al., 1996), además debemos considerar la cantidad de accesorios presentes en Puerto Peñasco.

En Puerto Peñasco los feldespatos disminuyen por el aumento de accesorios, más adelante podremos ver un aumento en la composición de feldespatos, al normalizar la composición ($C_T - L_T - F_T$) (Tabla 4).

Los líticos volcánicos (Tabla 5) están presente en bajas cantidades, esto coincide con la geología de la zona, en donde los aparatos volcánicos se encuentran en su mayoría al SE del área de estudio (Figura 2). Estos complejos volcánicos aportan sedimento al área de estudio mediante las descargas del Río Sonoyta, las cuales son efímeras durante la temporada de lluvias.

En el Golfo de Santa Clara observamos el mayor contenido de líticos volcánicos y dado que las fuentes se encuentran fuera de la región podemos suponer que estos líticos proceden del delta del Río Colorado. Las fuentes de roca volcánica cercanas al Golfo de Santa Clara se encuentran en las planicies del delta que contienen fragmentos de rocas volcánicas.

En Puerto Peñasco observamos el menor contenido de líticos volcánicos debido a la presencia de mayor cantidad de carbonatos y su lejanía con las fuentes volcánicas. Las fuentes de roca volcánica cercanas a Puerto Peñasco se encuentran en el complejo del Pinacate. También, los ambientes de alta energía, como en la costa, influyen en la depositación de fragmentos de roca en el sedimento de las dunas costeras (Le Pera & Critelli, 1977; McBride et al., 1996; Kasper-Zubillaga et al., 1999, Le Pera & Arribas, 2004).

En las localidades del desierto el contenido de líticos volcánicos es similar. De acuerdo con el régimen de vientos. En San Luis Río Colorado las fuentes de roca volcánica están al NW en las sierras americanas y el campo de dunas algodones. En el Pinacate las fuentes de roca volcánica se encuentran al NW en Sierra Blanca y al SW en el Desierto de Altar. De acuerdo con la distancia de éstas fuentes de sedimento a las localidades es la influencia de líticos volcánicos en la composición.

En el desierto en San Luis Río Colorado y el Pinacate se presenta el mayor contenido de líticos sedimentarios mientras que las localidades de la costa el Golfo de Santa Clara y Puerto

Peñasco presentan menor cantidad de líticos sedimentarios. Lo anterior es debido a la baja resistencia mecánica y química de los líticos sedimentarios comparados a los líticos volcánicos lo cual propicia menor abundancia de los sedimentarios de la costa. Sin embargo, los líticos sedimentarios dominan en la composición de líticos debido a su alta resistencia a la abrasión especialmente los líticos sedimentarios de grano fino como el pedernal. También su abundancia se debe a que la mayor fuente de suministro para las dunas es sedimentaria

Los líticos metamórficos son prácticamente inexistentes en la composición (Tabla 2) debido a la poca exposición de metamórficos en el área. Salvo por algunas excepciones, como lo son los casos de las estaciones G4F y G6F del Golfo de Santa Clara y en la estación P4F de Puerto Peñasco en donde se observaron líticos metamórficos.

En el Golfo de Santa Clara los sedimentos relictos del delta pueden ser la fuente de los líticos metamórficos. En el Pinacate se observan unidades metamórficas alejadas del cauce del Río Sonoyta, mismas que pueden ser la fuente de los líticos metamórficos en Puerto Peñasco.

Los líticos plutónicos se mantienen constantes en tres de las localidades. En el Golfo de Santa Clara se presenta el mayor contenido de líticos plutónicos. Esto indica que las fuentes plutónicas tienen mayor influencia en el Golfo de Santa Clara. Dado que no se observan fuentes plutónicas o graníticas cerca del Golfo de Santa Clara es probable pensar que la procedencia del sedimento es el Delta del Río Colorado con fragmentos plutónicos no disgregados.

Por otro lado el contenido de accesorios es constante, salvo en la localidad de Puerto Peñasco en donde el valor aumenta considerablemente, entrando en competencia con las demás componentes.

En Puerto Peñasco, existe un alto contenido de accesorios en su mayoría carbonatos marinos biógenos menor que al 25 % en la playa, por lo cual no se clasifican como arenas calcáreas (USGS, 2005). En el caso de los accesorios marinos de origen biógeno observados en Puerto Peñasco, se identificaron restos de conchas y coral.

No se observaron patrones de variación regional de los modos detríticos de las muestras; lo cual indica que las fuentes de sedimento presentes en cada localidad están en competencia. Esta competencia produce un tipo específico de sedimento en cada localidad.

ORIGEN COMPOSICIONAL Y ALTERACIÓN QUÍMICA
EN DUNAS DEL DESIERTO Y COSTERAS DEL ESTADO DE SONORA, MÉXICO

TABLA 2. ANÁLISIS MODAL PETROGRÁFICO

MUESTRA	Cm	Cp	F _T	Lv	Ls	Lm	Lp	Acc	Suma
SAN LUIS RIO COLORADO									
C1f	142	1	24	3	16	0	1	13	200
C1c	166	2	12	2	13	0	3	2	200
C2f	152	7	12	3	19	0	0	7	200
C2c	147	1	18	4	15	0	2	13	200
C3f	149	2	15	5	20	0	5	4	200
C3c	150	4	18	2	19	0	3	4	200
C4f	155	3	15	2	17	0	2	6	200
C4c	157	3	16	2	13	0	2	7	200
C5f	156	0	17	1	16	0	1	9	200
C5c	153	0	18	2	18	0	3	6	200
C6f	154	3	18	1	12	0	1	11	200
C6c	143	3	20	2	14	0	8	10	200
C7f	137	8	15	1	18	0	5	16	200
C7c	148	3	13	2	20	0	1	13	200
Media	150.64	2.86	16.50	2.29	16.43	0.00	2.64	8.64	200
PINACATE									
P1f	153	6	20	0	16	0	2	3	200
P1C	158	6	14	0	17	0	1	4	200
P2f	160	0	12	1	17	0	7	3	200
P2c	152	4	14	2	19	0	4	5	200
P3f	156	0	16	6	16	0	5	1	200
P3c	166	1	14	4	11	0	3	1	200
P4f	166	3	14	3	4	0	3	7	200
P4C	155	2	20	6	10	0	3	4	200
P5c	163	3	20	1	12	0	1	0	200
P5f	163	4	13	4	13	0	2	1	200
P6f	165	5	18	1	8	0	3	0	200
P6c	166	4	12	2	8	0	2	6	200
P7f	163	1	5	4	22	0	1	4	200
P7c	169	2	9	6	8	0	1	5	200
P8F	165	1	13	6	12	0	0	3	200
P8C	167	1	12	2	13	0	2	3	200
Media	161.69	2.69	14.13	3.00	12.88	0.00	2.50	3.13	200
GOLFO DE SANTA CLARA									
G1f	154	4	8	4	10	0	10	10	200
G1c	159	1	4	8	17	0	3	8	200
G2f	152	4	14	5	16	0	2	7	200
G2c	159	3	14	5	7	0	7	5	200
G3f	148	6	17	11	5	0	8	5	200
G3c	150	4	16	5	9	0	9	7	200
G4f	164	8	7	3	5	1	6	6	200
G4c	154	3	15	3	12	0	5	8	200
G5f	159	1	10	4	15	0	5	6	200
G5c	160	1	6	6	14	0	4	9	200
G6f	149	4	12	1	23	1	6	4	200
G6c	152	3	10	7	17	0	4	7	200
Media	155.00	3.50	11.08	5.17	12.50	0.17	5.75	6.83	200
PUERTO PEÑASCO									
Pe1f	156	0	10	1	10	0	2	21	200
Pe1c	133	4	10	4	10	0	3	36	200
Pe2f	152	0	3	1	7	0	2	35	200
Pe2c	108	2	9	2	5	0	1	73	200
Pe3f	174	0	6	0	2	0	1	17	200
Pe3c	138	0	17	0	8	0	4	33	200
Pe4f	124	1	14	1	6	1	2	51	200
Pe4c	123	1	18	5	7	0	2	44	200
Pe5f	122	3	5	0	7	0	2	61	200
Pe5c	143	2	11	1	8	0	5	30	200
Pe6f	127	3	17	5	11	0	0	37	200
Pe6c	145	1	4	1	3	0	1	45	200
Media	137.08	1.42	10.33	1.75	7.00	0.08	2.08	40.25	200

ORIGEN COMPOSICIONAL Y ALTERACIÓN QUÍMICA
EN DUNAS DEL DESIERTO Y COSTERAS DEL ESTADO DE SONORA, MÉXICO

TABLA 3. COMPOSICIÓN PETROGRÁFICA (%)

Muestra	%C _T	%F _T	%L _T	%Acc	Suma %
SAN LUIS RÍO COLORADO					
C1c	84.00	6.00	9.00	1.00	100.00
C1f	71.50	12.00	10.00	6.50	100.00
C2c	74.00	9.00	10.50	6.50	100.00
C2f	79.50	6.00	11.00	3.50	100.00
C3c	77.00	9.00	12.00	2.00	100.00
C3f	75.50	7.50	15.00	2.00	100.00
C4c	80.00	8.00	8.50	3.50	100.00
C4f	79.00	7.50	10.50	3.00	100.00
C5c	76.50	9.00	11.50	3.00	100.00
C5f	78.00	8.50	9.00	4.50	100.00
C6c	73.00	10.00	12.00	5.00	100.00
C6f	78.50	9.00	7.00	5.50	100.00
C7c	75.50	6.50	11.50	6.50	100.00
C7f	72.50	7.50	12.00	8.00	100.00
Media	76.75	8.25	10.68	4.32	100.00
PINACATE					
P1C	82.00	7.00	9.00	2.00	100.00
P1f	79.50	10.00	9.00	1.50	100.00
P2c	78.00	7.00	12.50	2.50	100.00
P2f	80.00	6.00	12.50	1.50	100.00
P3c	83.50	7.00	9.00	0.50	100.00
P3f	78.00	8.00	13.50	0.50	100.00
P4C	78.50	10.00	9.50	2.00	100.00
P4f	84.50	7.00	5.00	3.50	100.00
P5c	83.00	10.00	7.00	0.00	100.00
P5f	83.50	6.50	9.50	0.50	100.00
P6c	85.00	6.00	6.00	3.00	100.00
P6f	85.00	9.00	6.00	0.00	100.00
P7c	85.50	4.50	7.50	2.50	100.00
P7f	82.00	2.50	13.50	2.00	100.00
P8C	84.00	6.00	8.50	1.50	100.00
P8F	83.00	6.50	9.00	1.50	100.00
Media	82.19	7.06	9.19	1.56	100.00
GOLFO DE SANTA CLARA					
G1c	80.00	2.00	14.00	4.00	100.00
G1f	79.00	4.00	12.00	5.00	100.00
G2c	81.00	7.00	9.50	2.50	100.00
G2f	78.00	7.00	11.50	3.50	100.00
G3c	77.00	8.00	11.50	3.50	100.00
G3f	77.00	8.50	12.00	2.50	100.00
G4c	78.50	7.50	10.00	4.00	100.00
G4f	86.00	3.50	7.50	3.00	100.00
G5c	80.50	3.00	12.00	4.50	100.00
G5f	80.00	5.00	12.00	3.00	100.00
G6c	77.50	5.00	14.00	3.50	100.00
G6f	76.50	6.00	15.50	2.00	100.00
Media	79.25	5.54	11.79	3.42	100.00
PUERTO PEÑASCO					
Pe1c	68.50	5.00	8.50	18.00	100.00
Pe1f	78.00	5.00	6.50	10.50	100.00
Pe2c	55.00	4.50	4.00	36.50	100.00
Pe2f	76.00	1.50	5.00	17.50	100.00
Pe3c	69.00	8.50	6.00	16.50	100.00
Pe3f	87.00	3.00	1.50	8.50	100.00
Pe4c	62.00	9.00	7.00	22.00	100.00
Pe4f	62.50	7.00	5.00	25.50	100.00
Pe5c	72.50	5.50	7.00	15.00	100.00
Pe5f	62.50	2.50	4.50	30.50	100.00
Pe6c	73.00	2.00	2.50	22.50	100.00
Pe6f	65.00	8.50	8.00	18.50	100.00
Media	69.25	5.17	5.46	20.13	100.00

Los resultados expresados en porcentajes se muestran en la Tabla 3. Es claro que los cuarzos abundan en mayor proporción en las cuatro localidades. Estos porcentajes de cuarzos nos indican que las arenas presentan un grado alto de madurez mineralógica (Folk, 1971; Nesbitt & Young, 1984). De acuerdo al porcentaje de cuarzos, superior a los demás modos composicionales en una proporción mayor al 50%, las arenas se clasifican como arenas *cuarcíticas* (Pettijohn et al., 1972; Folk, 1971). En las dos localidades de la costa los valores de la composición de los feldespatos presentan contenidos menores que las localidades tierra adentro. Esto puede explicarse en función de la resistencia de los feldespatos al intemperismo. En la costa, los procesos atmosféricos, pluviales y costeros intemperizan a una tasa mayor a los minerales (Nesbitt & Young, 1982).

En cuanto a los líticos totales observamos una composición constante, salvo en el caso de Puerto Peñasco en donde la concentración de líticos disminuye en casi un 50% (Tablas 3 y 5). La probable fuente de líticos de Puerto Peñasco, ubicada en el complejo del Pinacate, tiene menos influencia debido a la temporalidad y

cantidad de aporte de sedimento de la fuente. Esto se hace presente durante la época de lluvias cuando descarga el Río Sonoyta.

ORIGEN COMPOSICIONAL Y ALTERACIÓN QUÍMICA
EN DUNAS DEL DESIERTO Y COSTERAS DEL ESTADO DE SONORA, MÉXICO

Tabla 4. COMPOSICIÓN PETROGRÁFICA NORMALIZADA AL 100% (C_T – F_T – L_T)

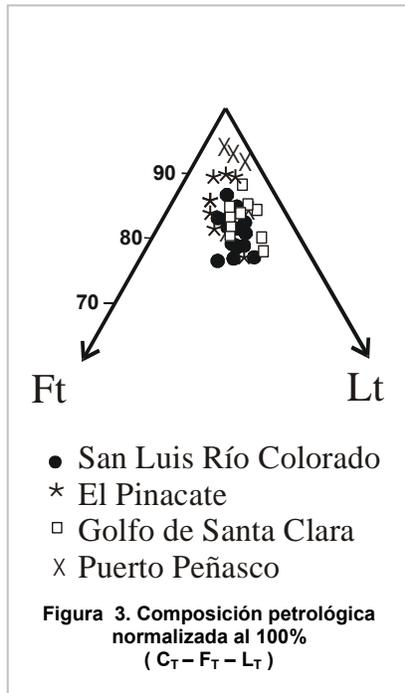
Muestra	%C _T	%F _T	%L _T	Suma %
SAN LUIS RÍO COLORADO				
C1c	84.85	6.06	9.09	100.00
C1f	76.47	12.83	10.70	100.00
C2c	79.14	9.63	11.23	100.00
C2f	82.38	6.22	11.40	100.00
C3c	78.57	9.18	12.24	100.00
C3f	77.04	7.65	15.31	100.00
C4c	82.90	8.29	8.81	100.00
C4f	81.44	7.73	10.82	100.00
C5c	78.87	9.28	11.86	100.00
C5f	81.68	8.90	9.42	100.00
C6c	76.84	10.53	12.63	100.00
C6f	83.07	9.52	7.41	100.00
C7c	80.75	6.95	12.30	100.00
C7f	78.80	8.15	13.04	100.00
Media	80.22	8.62	11.16	100.00
SD	2.61	1.78	2.02	0.00
PINACATE				
P1C	83.67	7.14	9.18	100.00
P1f	80.71	10.15	9.14	100.00
P2c	80.00	7.18	12.82	100.00
P2f	81.22	6.09	12.69	100.00
P3c	83.92	7.04	9.05	100.00
P3f	78.39	8.04	13.57	100.00
P4C	80.10	10.20	9.69	100.00
P4f	87.56	7.25	5.18	100.00
P5c	83.00	10.00	7.00	100.00
P5f	83.92	6.53	9.55	100.00
P6c	87.63	6.19	6.19	100.00
P6f	85.00	9.00	6.00	100.00
P7c	87.69	4.62	7.69	100.00
P7f	83.67	2.55	13.78	100.00
P8C	85.28	6.09	8.63	100.00
P8F	84.26	6.60	9.14	100.00
Media	83.49	7.17	9.33	100.00
SD	2.84	2.04	2.69	0.00
GOLFO DE SANTA CLARA				
G1c	83.33	2.08	14.58	100.00
G1f	83.16	4.21	12.63	100.00
G2c	83.08	7.18	9.74	100.00
G2f	80.83	7.25	11.92	100.00
G3c	79.79	8.29	11.92	100.00
G3f	78.97	8.72	12.31	100.00
G4c	81.77	7.81	10.42	100.00
G4f	88.66	3.61	7.73	100.00
G5c	84.29	3.14	12.57	100.00
G5f	82.47	5.15	12.37	100.00
G6c	80.31	5.18	14.51	100.00
G6f	78.06	6.12	15.82	100.00
Media	82.05	5.74	12.21	100.00
SD	2.83	2.17	2.21	0.00
PUERTO PEÑASCO				
Pe1c	83.54	6.10	10.37	100.00
Pe1f	87.15	5.59	7.26	100.00
Pe2c	86.61	7.09	6.30	100.00
Pe2f	92.12	1.82	6.06	100.00
Pe3c	82.63	10.18	7.19	100.00
Pe3f	95.08	3.28	1.64	100.00
Pe4c	79.49	11.54	8.97	100.00
Pe4f	83.89	9.40	6.71	100.00
Pe5c	85.29	6.47	8.24	100.00
Pe5f	89.93	3.60	6.47	100.00
Pe6c	94.19	2.58	3.23	100.00
Pe6f	79.75	10.43	9.82	100.00
Media	86.70	6.47	6.83	100.00
SD	5.25	3.31	2.51	0.00

Se observa que en las localidades de la costa en Puerto Peñasco y el Golfo de Santa Clara, la composición de feldespatos es menor que en el desierto en San Luis Río Colorado y el Pinacate (Tabla 4). Los feldespatos presentan una baja resistencia al intemperismo químico degradándose a mayor velocidad que en el desierto. La composición de líticos es más alta en el Golfo de Santa Clara y San Luis Río Colorado, debido al aporte de sedimento rico en líticos del delta y de las playas del Río Colorado. El cuarzo presenta una tendencia de incremento de *W* a *E*, aumentando la concentración en las localidades del *E* (Pinacate, Puerto Peñasco). En la costa las mareas producen alta energía y corrientes que generan más cuarzo al degradar los líticos. Por tanto podemos decir que la energía concentra más cuarzo en la costa (Mack, 1984; Kasper-Zubillaga et al., 1999).

ORIGEN COMPOSICIONAL Y ALTERACIÓN QUÍMICA
EN DUNAS DEL DESIERTO Y COSTERAS DEL ESTADO DE SONORA, MÉXICO

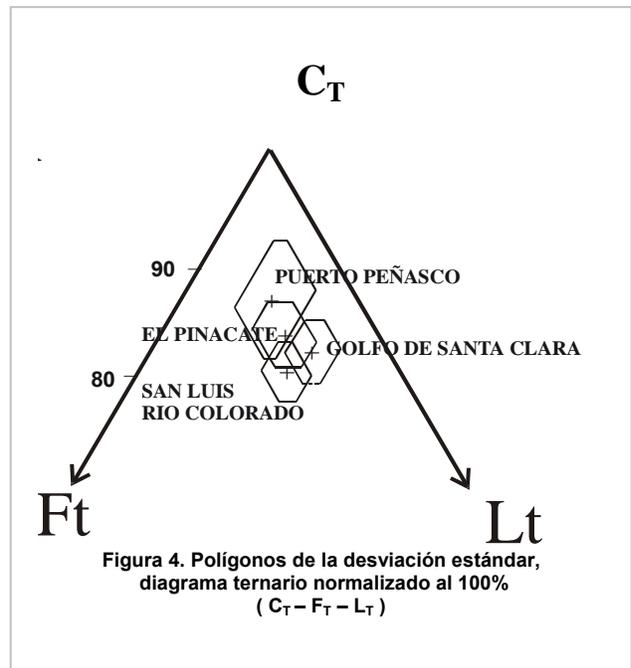
Tabla 5. COMPOSICIÓN DE LÍTICOS NORMALIZADA AL 100% ($L_v - L_s - L_M + L_p$)

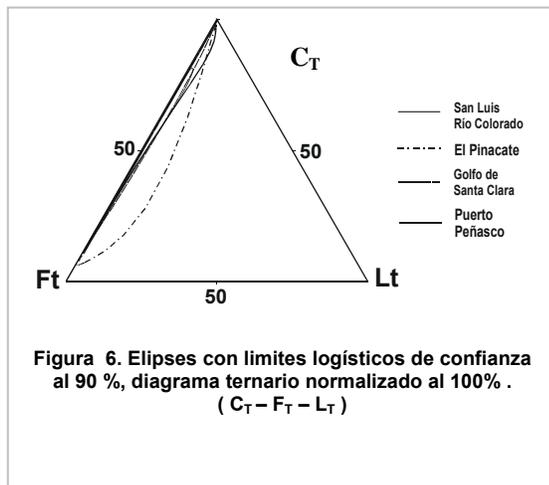
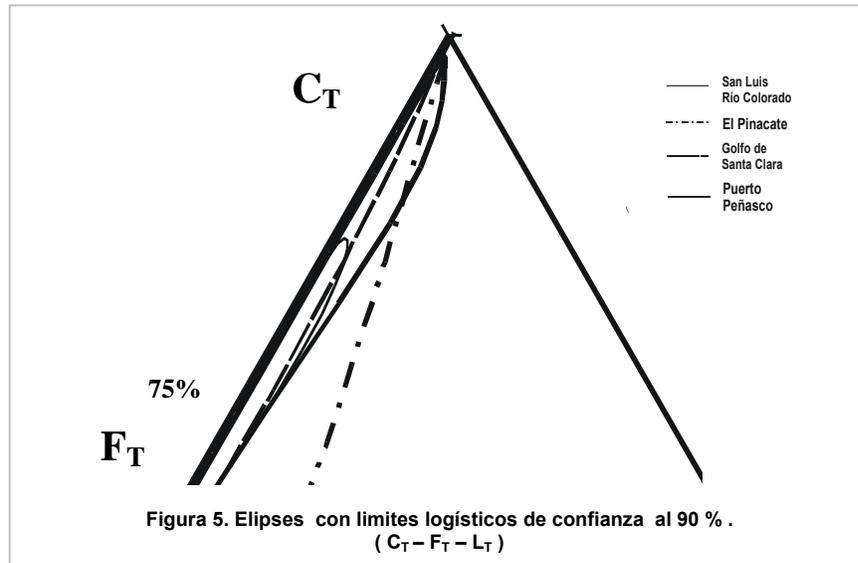
Muestra	%L _v	%L _s	%L _M +L _p	Suma %
SAN LUIS RÍO COLORADO				
C1c	11.11	72.22	16.67	100.00
C1f	15.00	80.00	5.00	100.00
C2c	19.05	71.43	9.52	100.00
C2f	13.64	86.36	0.00	100.00
C3c	8.33	79.17	12.50	100.00
C3f	16.67	66.67	16.67	100.00
C4c	11.76	76.47	11.76	100.00
C4f	9.52	80.95	9.52	100.00
C5c	8.70	78.26	13.04	100.00
C5f	5.56	88.89	5.56	100.00
C6c	8.33	58.33	33.33	100.00
C6f	7.14	85.71	7.14	100.00
C7c	8.70	86.96	4.35	100.00
C7f	4.17	75.00	20.83	100.00
Media	10.70	76.92	12.37	100.00
SD	4.26	8.52	8.35	0.00
PINACATE				
P1C	0.00	94.44	5.56	100.00
P1f	0.00	88.89	11.11	100.00
P2c	8.00	76.00	16.00	100.00
P2f	4.00	68.00	28.00	100.00
P3c	22.22	61.11	16.67	100.00
P3f	22.22	59.26	18.52	100.00
P4C	31.58	52.63	15.79	100.00
P4f	30.00	40.00	30.00	100.00
P5c	7.14	85.71	7.14	100.00
P5f	21.05	68.42	10.53	100.00
P6c	16.67	66.67	16.67	100.00
P6f	8.33	66.67	25.00	100.00
P7c	40.00	53.33	6.67	100.00
P7f	14.81	81.48	3.70	100.00
P8C	11.76	76.47	11.76	100.00
P8F	33.33	66.67	0.00	100.00
Media	16.33	70.07	13.61	100.00
SD	12.33	14.40	8.62	0.00
GOLFO DE SANTA CLARA				
G1c	28.57	60.71	10.71	100.00
G1f	16.67	41.67	41.67	100.00
G2c	26.32	36.84	36.84	100.00
G2f	21.74	69.57	8.70	100.00
G3c	21.74	39.13	39.13	100.00
G3f	45.83	20.83	33.33	100.00
G4c	15.00	60.00	25.00	100.00
G4f	20.00	33.33	46.67	100.00
G5c	25.00	58.33	16.67	100.00
G5f	16.67	62.50	20.83	100.00
G6c	25.00	60.71	14.29	100.00
G6f	3.23	74.19	22.58	100.00
Media	21.91	53.00	25.09	100.00
SD	10.05	16.48	12.83	0.00
PUERTO PEÑASCO				
Pe1c	23.53	58.82	17.65	100.00
Pe1f	7.69	76.92	15.38	100.00
Pe2c	25.00	62.50	12.50	100.00
Pe2f	10.00	70.00	20.00	100.00
Pe3c	0.00	66.67	33.33	100.00
Pe3f	0.00	66.67	33.33	100.00
Pe4c	35.71	50.00	14.29	100.00
Pe4f	10.00	60.00	30.00	100.00
Pe5c	7.14	57.14	35.71	100.00
Pe5f	0.00	77.78	22.22	100.00
Pe6c	20.00	60.00	20.00	100.00
Pe6f	31.25	68.75	0.00	100.00
Media	16.03	64.12	19.85	100.00
SD	12.52	8.14	10.47	0.00



Los siguientes diagramas ternarios petrográficos muestran las tendencias y dispersión de la composición petrográfica de las arenas gráficamente. En el primer diagrama observamos la composición de cuarzos totales, feldespatos totales y líticos totales normalizada al 100% (Figura 3). Se observan regiones en donde las localidades se traslapan. En todas las localidades es clara la tendencia hacia el polo de los cuarzos totales. Las arenas de Puerto Peñasco presentan el mayor contenido de cuarzo, ocasionado por los procesos costeros de alta energía presentes en esta localidad. Debido a la baja resistencia mecánica de los líticos plutónicos, estos se disgregan por la acción de los procesos costeros, produciendo cuarzos y feldespatos.

Se muestra la dispersión de la composición de cuarzos, feldespatos y líticos en los polígonos de la desviación estándar y en las elipses de límites logísticos de confianza al 90 % (Weltje, 2002; Le Pera & Arribas, 2004) (Figuras 4, 5 y 6). En los polígonos existe una mayor dispersión en la dirección del polo de cuarzos. Las regiones de las cuatro localidades tienden hacia el polo de los líticos. El límite inferior de las cuatro regiones se encuentra por arriba del 50% de los polos de L_T y F_T. En el diagrama ternario de las elipses hay una tendencia hacia los polos C_T y F_T. Además, las cuatro regiones son bastante amplias, van desde el polo C_T hasta el polo F_T. Las elipses están graficadas con base en un algoritmo estadísticamente más riguroso (estadística multivariada), mientras que los polígonos se grafican con base en un algoritmo estadísticamente univariado (Aitchison, 1986). Las elipses acotan mucho mejor la región de probabilidad alrededor de la media, definiendo más precisamente la dispersión. Con ello podemos realizar mejor las interpretaciones de procedencia de la arena de las dunas.

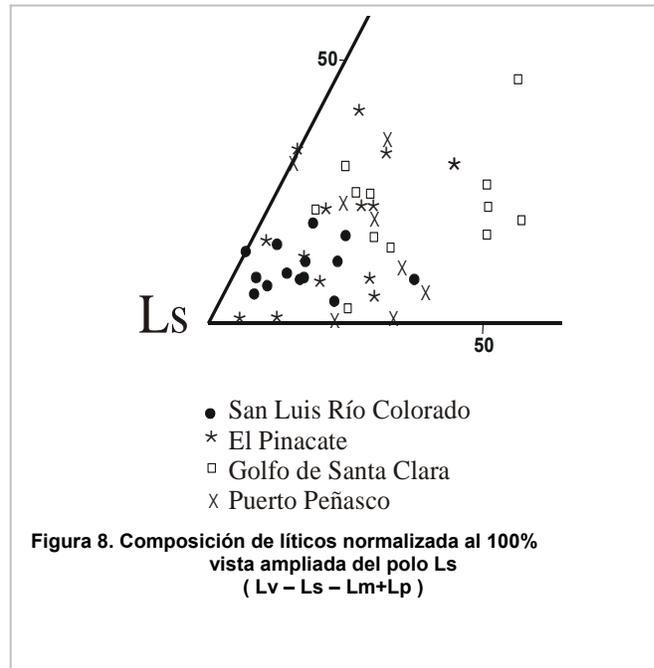
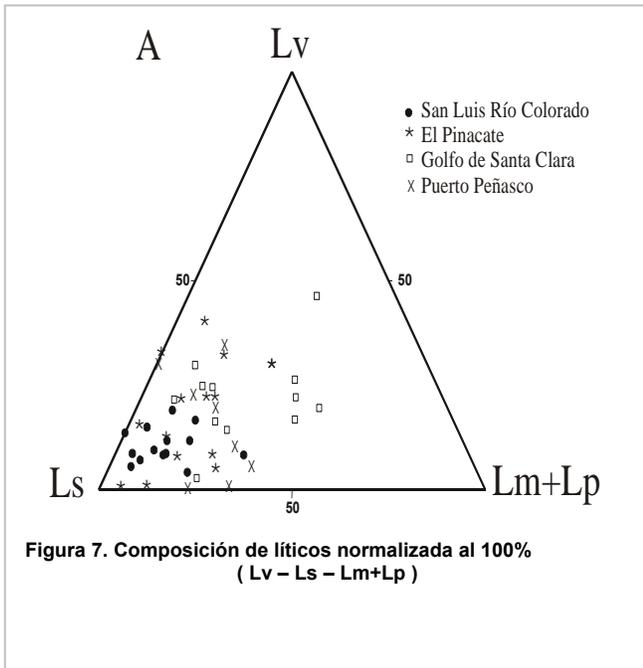




Las elipses de las cuatro localidades (Figuras 5 y 6) muestran una amplia dispersión hacia los minerales menos densos como los cuarzos y los feldespatos, mientras que la influencia de líticos es mínima. Al ser de mayor densidad los líticos que los cuarzos y feldespatos (Densidad Promedio 2.60 g cm^{-3} a 2.75 g cm^{-3}) se infiere entonces que el viento es la fuente de más influencia en las cuatro localidades, al transportar más cuarzos y feldespatos que líticos (Pye & Mazullo, 1984). En

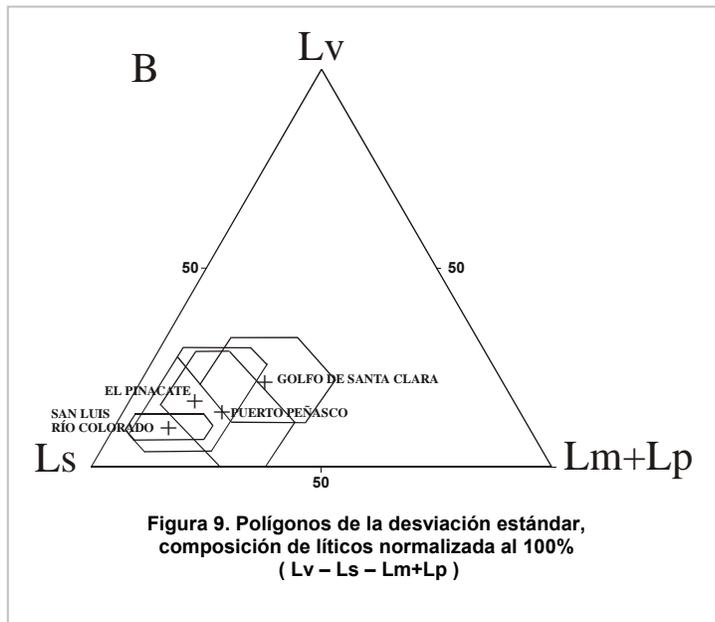
San Luis Río Colorado, se observa menor dispersión del cuarzo en comparación que las demás localidades, esto habla de una la homogeneidad de la fracción de cuarzo. Las arenas de Puerto Peñasco, cercanas al polo de cuarzos, tienden más hacia los líticos seguidas de San Luis Río Colorado y del Golfo de Santa Clara. Las cuatro localidades presentan fuertes traslapes lo cual sugiere que las fuentes de las cuatro localidades son las mismas en diferentes proporciones.

La composición de líticos normalizada al 100% (Figuras 7 y 8), muestra una tendencia a los líticos sedimentarios, por la posible influencia del delta del Colorado en la composición de las dunas (Muhs et al., 2003). Las localidades de la costa presentan menor dispersión hacia los líticos sedimentarios, debido a su baja resistencia química en condiciones de humedad.



El Golfo de Santa Clara presenta una dispersión mayor hacia el polo de líticos volcánicos y plutónico-metamórficos, debido a que el sedimento procede del delta del Río Colorado mientras que las demás localidades tienen más influencia de sedimento fluvial, del desierto y de la costa.

En la composición de líticos, los polígonos (Figura 9) muestran que San Luis Río Colorado se traslapa con el Pinacate y con Puerto Peñasco; y que el Golfo de Santa Clara se traslapa con el Pinacate y Puerto Peñasco. Sin embargo, San Luis Río Colorado y el Golfo de Santa Clara no se traslapan.

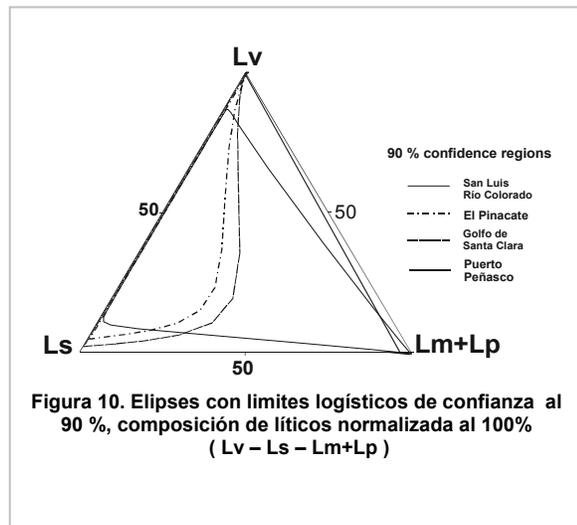


San Luis Río Colorado se traslapa con el Pinacate y con Puerto Peñasco; y que el Golfo de Santa Clara se traslapa con el Pinacate y Puerto Peñasco. Sin embargo, San Luis Río Colorado y el Golfo de Santa Clara no se traslapan. La influencia de líticos volcánicos es mínima, de acuerdo con la presencia de aparatos volcánicos en el área de estudio. Las cuatro localidades presentan una tendencia hacia el polo de líticos sedimentarios y plutónico-metamórficos. Entonces las fuentes de

San Luis Río Colorado están más influidas por el sedimento del desierto que por el sedimento del delta y que el Golfo de Santa Clara está dominado por sedimento procedente del delta. En

Puerto Peñasco también hay influencia en la dirección del eje $Ls - Lm+Lp$, debido posiblemente a la cercanía con fuentes graníticas cercanas al Río Sonoyta (Figura 1) y las corrientes marinas del Alto Golfo de California.

Las elipses (Figura 10) muestran la dispersión de las localidades en la composición de



lítica, Puerto Peñasco y San Luis Río Colorado presentan una dispersión regular hacia los tres polos, mientras que el Golfo de Santa Clara y el Pinacate presentan una tendencia de dispersión hacia el polo de los lítica sedimentarios y los lítica volcánicos. De acuerdo con esto, tanto el Pinacate como el Golfo de Santa Clara presentan sedimento más homogéneo en cuanto a la composición de lítica plutónico-metamórfico, mientras que San Luis Río Colorado y Puerto Peñasco son más heterogéneos en cuanto al

contenido de lítica plutónico-metamórfico. Las fuentes volcánicas son poco representativas pero alteran significativamente la dispersión de la composición.

III.III. GEOQUÍMICA

Los resultados de la composición química de elementos mayores se presentan en la tabla 6. Se observan valores mayores de SiO_2 comparados con los demás óxidos mayores en las cuatro localidades (Honda & Shimizu, 1998). Se observan variaciones en cuanto al contenido de SiO_2 , P_2O_5 , K_2O , CaO entre las localidades. Las muestras de las cuatro localidades se analizaron sin digerir los carbonatos. Los valores del contenido de CaO se calcularon de acuerdo con la relación $Ca:Na = 1:3$ en los feldespatos, de la corteza continental superior para el cálculo del índice de alteración química (Taylor & McLennan, 1985; Nesbitt & Young, 1989; Rudnick & Fountain, 1995; Honda & Shimizu, 1998).

En cuanto al contenido de SiO_2 las dunas tanto del desierto como de la costa presentan altos contenido de sílice indicando alto grado de madurez. En el caso de puerto Peñasco se observa un contenido menor de SiO_2 asociado a un incremento de Al_2O_4 y de CaO . Esto indica que los procesos costeros de alta energía, al generar más cuarzos, también generan feldespatos frescos químicamente hablando. Por lo cual el valor de Al_2O_4 aumenta en Puerto Peñasco y además se incrementan los carbonatos marinos biógenos. Puerto Peñasco presenta el porcentaje

de SiO_2 más bajo, inclusive menor al valor promedio de la corteza continental superior (Taylor & McLennan, 1985; Rudnick & Fountain, 1995). La entrada de carbonatos marinos biógenos en Puerto Peñasco parece establecer una competencia entre los modos detríticos. Lo anterior influye en el tamaño de grano, la composición petrológica, y la composición geoquímica de las dunas de Puerto Peñasco (Tabla 6).

En las localidades de la costa y el desierto, el contenido de TiO_2 , Fe_2O_3 y MgO asociado a los minerales máficos, indica la presencia de líticos volcánicos principalmente y permanece constante. Presentando un aumento en San Luis Río Colorado y una disminución en Puerto Peñasco. En la costa en Puerto Peñasco se presenta una disminución de TiO_2 y Fe_2O_3 , asociado a la entrada de CaO excedente procedente de carbonatos marinos biógenos. San Luis Río Colorado presenta el valor más alto de MgO , indicando una fuente distinta de líticos volcánicos (Tabla 6).

El calcio, presente de manera detrítica a través de las plagioclasas está presente siendo la localidad de El Pinacate la de menor contenido de CaO . Esto nos indica que el sedimento de el Pinacate posiblemente tiene menor cantidad de plagioclasas cálcicas. (Tabla 6).

En cuanto al MnO , asociado a la actividad hidrotermal, presente en los líticos volcánicos, podemos ver que su concentración es mínima y variable debido a su alta movilidad. En el Golfo de Santa Clara se presenta el menor valor y en San Luis Río Colorado valor más alto. Con este valor podemos identificar una fuente distinta de líticos volcánicos. Los líticos volcánicos de Puerto Peñasco probablemente proceden de las unidades volcánicas del Pinacate. Mientras que los de Santa Clara proceden del Río Colorado. Esto nos indica una fuente distinta de líticos volcánicos en las localidades (Tabla 6).

El contenido de Na_2O guarda una relación directa con el K_2O y el Al_2O_3 , por la presencia de estos minerales en los feldespatos. Observamos variaciones similares en estos óxidos mayores. Puerto Peñasco presenta la mayor composición de Al_2O_3 , Na_2O y K_2O . Este enriquecimiento en Al_2O_3 , Na_2O y K_2O es debido a los feldespatos frescos que los procesos de alta energía producen, además de los cuarzos, al disgregar los distintos tipos de líticos. Las demás localidades no presentan variaciones regionales. El Golfo de Santa Clara, presenta el menor contenido de Al_2O_3 , Na_2O y K_2O , lo que corresponde posiblemente con el menor contenido de feldespatos (Tabla 6).

TABLA 6. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE ELEMENTOS MAYORES

MUESTRA	SiO ₂ %	TiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	MnO %	MgO %	CaO %	Na ₂ O %	K ₂ O %	P ₂ O ₅ %	P x C ₁ %	Suma %
C1 - f	85.79	0.26	5.56	1.57	0.0100	0.75	1.65	0.82	1.84	0.080	2.08	100.41
C2 - c	85.78	0.28	5.58	1.82	0.0250	0.55	1.85	0.93	1.76	0.052	1.78	100.41
C3 - f	89.24	0.17	4.79	1.18	0.0190	0.38	1.32	0.77	1.60	0.038	0.96	100.47
C4 - f	88.49	0.24	4.70	1.41	0.0100	0.46	1.29	0.72	1.65	0.050	1.30	100.32
C5 - f	87.68	0.13	4.44	0.87	0.0100	0.44	2.12	0.66	1.68	0.050	2.17	100.25
C6 - c	87.84	0.12	4.20	0.82	ND	0.42	2.35	0.59	1.60	0.040	2.30	100.28
Media	87.47	0.20	4.88	1.28	0.0148	0.50	1.76	0.75	1.69	0.05	1.77	100.36
SD	1.42	0.07	0.57	0.40	0.0069	0.13	0.43	0.12	0.10	0.02	0.53	0.09
P1 - c	88.92	0.17	5.51	0.91	ND	0.35	0.71	0.96	2.02	0.050	0.86	100.46
P3 - f	89.41	0.22	5.00	1.11	ND	0.32	0.73	0.98	1.82	0.050	0.77	100.41
P5 - f	89.20	0.17	5.39	0.90	ND	0.33	0.70	0.93	2.00	0.050	0.82	100.49
P6 - c	88.81	0.19	5.63	1.00	0.0110	0.35	0.71	0.85	2.00	0.050	0.75	100.35
P7 - f	87.80	0.21	5.86	1.11	0.0130	0.37	0.86	0.89	2.08	0.058	1.10	100.35
P8 - f	89.42	0.19	5.31	0.96	ND	0.32	0.73	0.82	1.94	0.040	0.74	100.47
Media	88.93	0.19	5.45	1.00	0.0120	0.34	0.74	0.91	1.98	0.05	0.84	100.42
SD	0.61	0.02	0.29	0.09	0.0014	0.02	0.06	0.06	0.09	0.01	0.14	0.06
G1 - c	88.70	0.22	4.52	1.19	0.0100	0.33	1.78	0.74	1.55	0.050	1.49	100.58
G3 - c	90.71	0.11	4.24	0.68	0.0040	0.29	1.08	0.69	1.68	0.044	0.89	100.42
G4 - c	91.26	0.25	3.06	1.24	0.0100	0.31	1.51	0.5	1.07	0.050	1.21	100.47
G5 - f	92.15	0.21	3.22	1.14	0.0060	0.26	1.07	0.51	1.16	0.038	0.78	100.54
G6 - c	91.32	0.19	3.62	0.97	0.0100	0.29	1.21	0.56	1.31	0.040	0.88	100.4
Media	90.83	0.20	3.73	1.04	0.0080	0.30	1.33	0.60	1.35	0.04	1.05	100.48
SD	1.30	0.05	0.63	0.23	0.0028	0.03	0.31	0.11	0.26	0.01	0.29	0.08
Pe1 - c	68.40	0.13	6.35	0.63	0.0100	0.33	11.71	1.37	2.27	0.530	8.61	100.34
Pe2 - f	70.07	0.14	4.69	0.70	0.0050	0.36	12.50	1.08	1.62	0.433	8.89	100.49
Pe3 - c	71.22	0.12	6.80	0.64	0.0100	0.33	9.61	1.55	2.53	0.550	7.03	100.39
Pe4 - c	69.90	0.11	6.19	0.58	0.0250	0.35	11.18	1.39	2.29	0.511	8.05	100.58
Pe6 - f	53.24	0.12	5.28	0.61	0.0100	0.40	20.87	1.28	1.86	0.610	16.13	100.41
Media	66.57	0.12	5.86	0.63	0.0120	0.35	13.17	1.33	2.11	0.53	9.74	100.44
SD	7.52	0.01	0.86	0.04	0.0076	0.03	4.43	0.17	0.37	0.06	3.64	0.09

1. P X C = PÉRDIDA POR CALCINACIÓN

La composición de Al₂O₃, Na₂O y K₂O en el Golfo de Santa Clara esta dominada por los feldespatos, más que por los líticos. En todas las localidades, salvo en una estación el Golfo de Santa Clara, el valor de K₂O es mayor al reportado por Taylor & McLennan (1985) (Tabla 6).

En la mayoría de las estaciones de Puerto Peñasco y el Pinacate el valor de K₂O es mayor al reportado por Rudnick & Fountain (1995). Este aumento de K₂O se debe a que el sedimento se encuentra asociado a los feldespatos de K los cuales son más estables químicamente que las plagioclasas (Tabla 6).

El incremento de P₂O₅ en Puerto Peñasco esta asociado al incremento de carbonatos. El P₂O₅ es el principal compuesto del mineral hidroxia apatita, constituyente de los esqueletos de corales y conchas. Tanto del P₂O₅ como del CaO en Puerto Peñasco se incrementan, por tanto es posible que el incremento de P₂O₅ se deba al incremento de carbonatos marinos biógenos.

La pérdida por calcinación no tiene que ver con la composición, sino con contenido de agua y materia orgánica. En Puerto Peñasco la pérdida por calcinación es alta, probablemente por el contenido de materia orgánica presente en forma de restos de conchas y corales.

INDICE DE ALTERACIÓN QUÍMICA

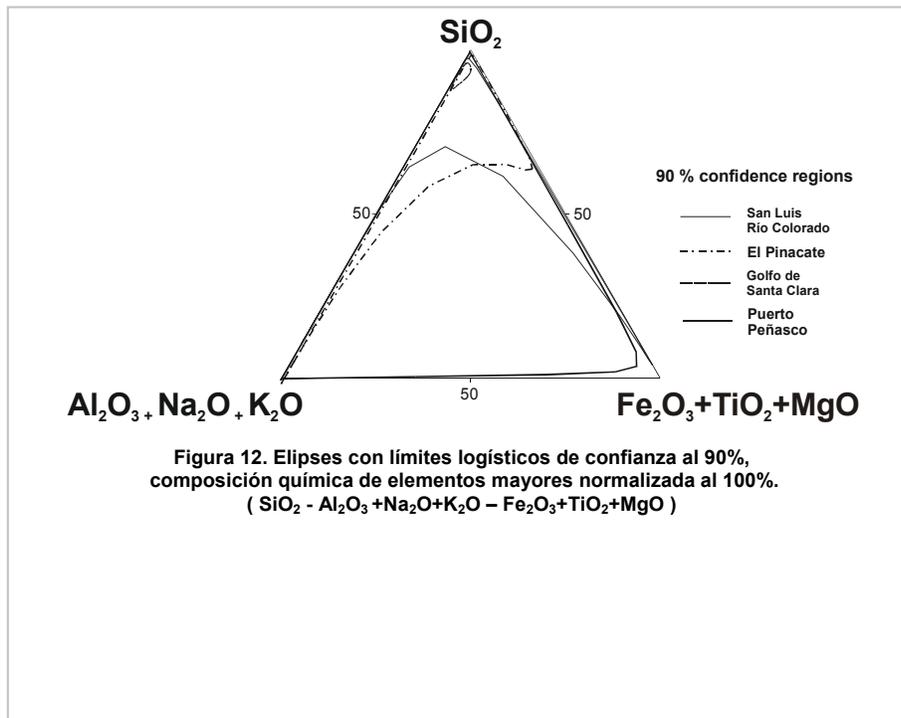
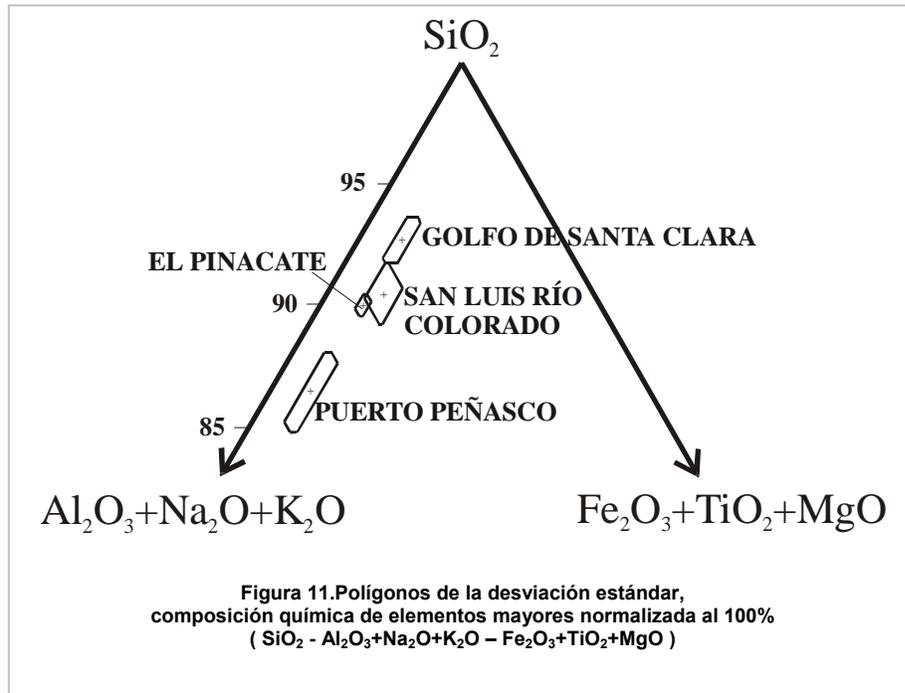
De acuerdo con el índice de alteración química (*CIA*), Puerto Peñasco presenta el sedimento menos alterado químicamente (49.34). Seguido, en orden ascendente del Pinacate (53.84), luego el Golfo de Santa Clara (54.33) y finalmente de San Luis Río Colorado (55.42) que presentó el mayor valor de *CIA*. Esto indica que el sedimento del desierto al igual que el del Golfo de Santa Clara esta más intemperizado químicamente que en Puerto Peñasco.

Esto puede asociarse a procesos costeros de mayor energía, que producen nuevos cuarzos y feldespatos al disgregarse la roca. El *CIA* nos sirve además para identificar variaciones entre estaciones de una misma localidad.

Las cuatro localidades no presentan variaciones significativas de *CIA* entre sus estaciones; por lo tanto no existen fuentes distintas de sedimento dentro de cada localidad, ya que la composición dentro de las estaciones en cada localidad es muy similar.

En los diagramas ternarios geoquímicos (Figura 11 y 12) se pueden observar los datos en tres polos normalizados al 100 %: SiO_2 : $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$: $\text{TiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_{3t} + \text{MgO}$. Asociamos el polo $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ a la composición de minerales de colores claros; y el polo $\text{TiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_{3t} + \text{MgO}$ a la composición de los minerales de color oscuro; incluyendo también el contenido general del sílice en las dos facciones y en los cuarzos totales.

En el diagrama de polígonos (Figura 11), las cuatro localidades presentan una tendencia dominante hacia el polo del SiO_2 y una tendencia de la dispersión hacia los minerales de colores claros. El Golfo de Santa Clara presenta la mayor tendencia hacia el polo del SiO_2 , dado su alto grado de *CIA*, posiblemente la fuente de sedimento es el sedimento relicto del delta. Puerto Peñasco presenta la menor tendencia hacia el polo del SiO_2 , por su bajo *CIA*, es probable que el aporte de sedimento sea reciente. Los procesos costeros de alta energía, presentes en esta localidad, producen nuevos fragmentos de roca, químicamente más frescos. La dispersión de las cuatro localidades se encuentra restringida hacia el polo de los minerales máficos, además la composición de minerales máficos es mucho menor que la de los minerales



claros. La influencia de los líticos volcánicos parece no determinar la dispersión de las muestras, por tanto podemos decir que la composición de la arena esta dominada por las fuentes plutónicas y sedimentarias. Lo anterior corresponde con las formaciones presentes en la cata geológica del área de estudio (Figura 1).

Esto indica una homogeneidad en el sedimento en cuanto a líticos volcánicos, pero una heterogeneidad en cuanto a líticos plutónicos –metamórficos. Las fuentes de líticos volcánicos están muy restringidas, mientras que las fuentes de los demás modos detríticos son distintas en cada localidad.

Las elipses (Figura 12) muestran una tendencia hacia el polo de sílice, las cuatro localidades se intersectan e incluso algunas quedan contenidas dentro de otras. A diferencia de los polígonos, en las elipses, se muestran que las localidades tienen características similares en donde las regiones se traslapan. Esto indica que la composición química de las cuatro localidades es similar. El Golfo de Santa Clara presenta la menor dispersión, quedando muy cerrada su envolvente. Esto indica que el sedimento del Golfo de Santa Clara tiene una procedencia bien definida dada su homogeneidad, probablemente el sedimento procede del delta del Río Colorado. Puerto Peñasco presenta una dispersión mayor hacia los tres polos. Esto habla de la heterogeneidad del sedimento de Puerto Peñasco.

San Luis Río Colorado presenta una dispersión mayor hacia los minerales máficos, indicando que el aporte de estos minerales máficos es heterogéneo estadísticamente mientras que los minerales claros son más homogéneos indicando una fuente de sedimento.

Probablemente la fuente de sedimento sea el campo de dunas Algodones y las sierras de E.U.A. en la frontera. El Pinacate por su parte, presenta más homogeneidad en los minerales máficos, y una dispersión mayor –más heterogénea- en cuanto a los minerales claros; esto se refuerza con la presencia de un aparato volcánico en las cercanías de esta localidad en la dirección NW y no se observa ninguna fuente cercana de líticos plutónicos, según la carta geológica de la zona de estudio (Figura 1).

En este estudio se confirman algunos de los antecedentes sobre la procedencia de las dunas del Desierto de Altar. Así podemos resumir que fuentes posibles del sedimento de las dunas son los abanicos fluviales y deltaicos del Río Colorado, las playas del Golfo de California, los abanicos fluviales del Pinacate, las rocas granitoides de la zona y las regiones más al NW en el desierto en EUA (Sweet et al., 1988).

Tabla 7. Pruebas de normalidad Kolmogorov – Smirnov
con $n=54$; $D=0.21$

SAN LUIS RÍO COLORADO		
log Q/F	n=14	D = .0757762
log F/L	n=14	D = .0512196
log Q/L	n=14	D = .0915895
Mz	n=14	D = .1709372
σ	n=14	D = .0980398
Ski	n=14	D = .2176718
K_G	n=14	D = .1624377
PINACATE		
log Q/F	n=16	D = .1523976
log F/L	n=16	D = .0935971
log Q/L	n=16	D = .0990489
Mz	n=16	D = .0906380
Σ	n=16	D = .1326421
Ski	n=16	D = .0743090
K_G	n=16	D = .1154107
GOLFO DE SANTA CLARA		
log Q/F	n=16	D = .1165220
log F/L	n=16	D = .1246661
log Q/L	n=16	D = .0841211
Mz	n=16	D = .1474856
Σ	n=16	D = .1537460
Ski	n=16	D = .1495980
K_G	n=16	D = .0718887
PUERTO PEÑASCO		
log Q/F	n=12	D = .1487225
log F/L	n=12	D = .1102430
log Q/L	n=12	D = .1791872
Mz	n=12	D = .0423845
Σ	n=12	D = .1031329
Ski	n=12	D = .0796944
K_G	n=12	D = .1492503

D = valor crítico

críticos (Tabla 8). Los parámetros del análisis discriminante indican que las variables que mejor discriminan entre los cuatro grupos de dunas son el tamaño de grano y la asimetría (Tabla 8). Esto indica distintos procesos de transporte, separando las localidades costeras de las desérticas dada la influencia de los procesos costeros que transportan sedimento más grueso y los procesos eólicos que transportan granos más pequeños. Los procesos eólicos producen arenas mejor clasificadas y los procesos costeros producen arenas moderadamente clasificadas.

Las distancias Mahalanobis (Tabla 8) indican que el Pinacate y el Golfo de Santa Clara son localidades significativamente distantes entre si. Probablemente esto se deba a que el sedimento del Golfo de Santa Clara procede del delta del Río Colorado, mientras que la fuente de sedimento del Pinacate ha sufrido más transporte desde el norte en E.U.A. y el propio

III.IV. ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARAMÉTRICO

ANÁLISIS DE DISCRIMINACIÓN LINEAL

El valor crítico D de la función de la prueba de normalidad no fue rebasado por ninguna de las series de datos analizadas. Una vez justificado el análisis de discriminación lineal procederemos a integrar la tabla de datos de entrada del análisis estadístico (Tabla 9) con las series : log Ct / Ft , log Ft / Lt , log Ct / Lt , Mz, σ , Ski, K_G . El análisis discriminante nos presenta las variables discriminantes así como la distancia Mahalanobis útil para discriminar entre los grupos.

Las variables discriminantes presentan valores de la distribución F observados que exceden a los valores F

Desierto de Altar. Puerto Peñasco y El Pinacate también son significativamente distantes. Lo anterior está vinculado a los distintos procesos costeros de mayor energía comparado con el transporte por viento en el Pinacate. Así también, San Luis Río Colorado y el Pinacate también presentan una distancia significativa relativa indicando procesos distintos de transporte y depositación del sedimento. Las localidades de San Luis Río Colorado y el Golfo de Santa Clara son significativamente cercanos entre sí porque el sedimento procedente de las descargas ancestrales del Río Colorado es el punto de similitud. El Golfo de Santa Clara y Puerto Peñasco presentan una cercanía relativa dados los procesos costeros en ambas localidades

Tabla 8. Análisis discriminante

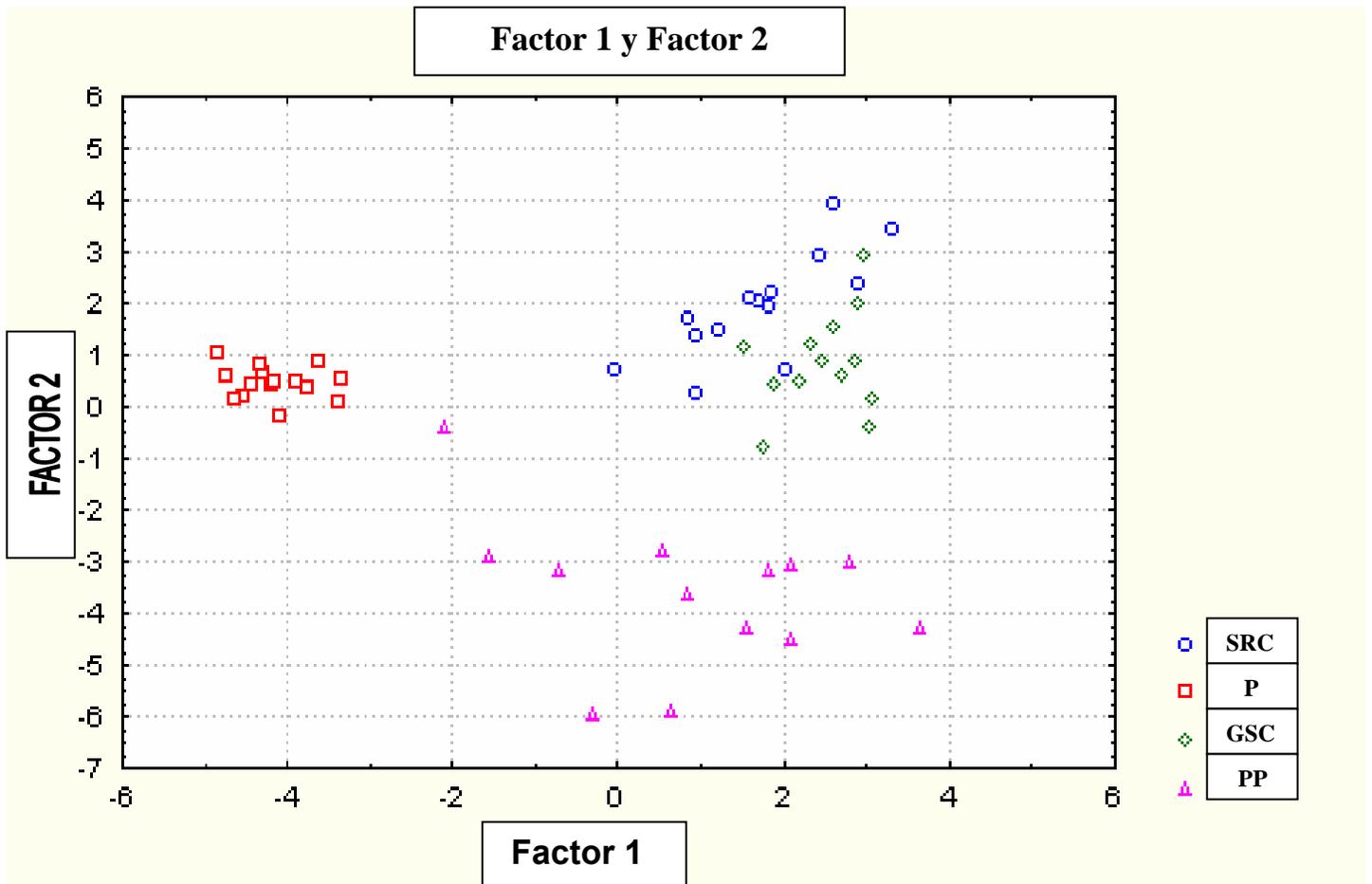
DISTANCIAS MAHALANOBIS						
LOCALIDAD	SRC	P	GSC	PP		
SRC	0.000	41.212	11.534	33.896		
P	41.212	0.000	48.602	44.674		
GSC	11.534	48.602	0.000	27.769		
PP	33.896	44.674	27.769	0.000		
Valores F; df = 5,46						
LOCALIDAD	SRC	P	GSC	PP		
SRC	----	52.810	12.645	37.161		
P	52.810	----	56.752	52.165		
GSC	12.645	56.752	----	28.102		
PP	37.161	52.165	28.102	----		
Resumen de la Función de Análisis Discriminante Paso 5, Número de variables en el modelo: 5; Agrupaciones: GROUPOS (4 grupos) Wilks' Lambda: .00974 approx. F (15,127)=36.971 p<0.0000						
VARIABLE	Wilks' Lambda	Lambda Parcial	F-remover (3,46)	p-nivel	Tolerancia	1-Tolerancia (Raíz cuadrada)
	M _z	0.04979635	0.19559975	63.0580406	2.4928E-16	0.88073695
Ski	0.04487444	0.21705347	55.3097801	2.6958E-15	0.60125607	0.39874393
SORT	0.02180922	0.44660705	18.9996052	3.6918E-08	0.75040948	0.24959052
K _e	0.01228057	0.79313552	3.99921846	0.01301514	0.57983798	0.42016202
Log F / L	0.01083847	0.89866495	1.7290132	0.17420457	0.88727677	0.11272323
Variables no incluidas en el modelo Df para todas la pruebas F: 3,45						
VARIABLE	Wilks' Lambda	Lambda Parcial	F para entrar	p-nivel	Tolerancia	1-Tolerancia (Raíz cuadrada)
	Log Q / F	0.00955652	0.98114711	0.28822726	0.83364969	0.49329782
Log Q / L	0.00955652	0.98114699	0.28822911	0.83364838	0.76797509	0.23202491

ORIGEN COMPOSICIONAL Y ALTERACIÓN QUÍMICA
EN DUNAS DEL DESIERTO Y COSTERAS DEL ESTADO DE SONORA, MÉXICO

Tabla 9. DATOS DE ENTRADA EN EL ANÁLISIS DISCRIMINATE

MUESTRA	log Ct/Ft	log Ft/Lt	log Ct/Lt	Mz	σ	Ski	K _G
SAN LUIS RIO COLORADO							
C1f	1.14613	-0.17609	0.97004	2.064	0.856	0.125	1.121
C1c	0.77512	0.07918	0.85431	2.528	1.609	0.491	1.828
C2f	0.91499	-0.06695	0.84804	1.96	1.002	0.491	1.828
C2c	1.12222	-0.26324	0.85897	2.046	0.845	0.307	1.280
C3f	0.93225	-0.12494	0.80731	2.147	1.046	0.307	1.280
C3c	1.00289	-0.30103	0.70186	1.947	0.881	0.335	0.892
C4f	1.00000	-0.02633	0.97367	2.09	0.934	0.191	1.060
C4c	1.02257	-0.14613	0.87644	2.024	0.951	0.191	0.920
C5f	0.92942	-0.10646	0.82296	2.114	1.152	0.335	1.136
C5c	0.96268	-0.02482	0.93785	1.963	1.133	0.391	1.202
C6f	0.86332	-0.07918	0.78414	2.061	0.777	0.196	1.057
C6c	0.94063	0.10914	1.04977	1.88	0.895	0.155	1.140
C7f	1.06503	-0.24778	0.81725	1.972	0.655	0.178	1.059
C7c	0.98528	-0.20412	0.78116	2.125	0.689	0.122	1.051
Media	0.96862	-0.11206	0.85657	2.066	0.959	0.273	1.204
PINACATE							
P1f	1.06872	-0.10914	0.95957	2.562	0.449	0.057	1.046
P1C	0.90037	0.04576	0.94612	2.498	0.403	0.074	1.026
P2f	1.04700	-0.25181	0.79518	2.617	0.393	0.052	0.995
P2c	1.12494	-0.31876	0.80618	2.651	0.368	0.040	0.967
P3f	1.07659	-0.10914	0.96744	2.517	0.490	0.040	1.040
P3c	0.98900	-0.22724	0.76176	2.464	0.382	0.054	0.981
P4f	0.89487	0.02228	0.91715	2.602	0.380	0.054	0.986
P4C	1.08176	0.14613	1.22789	2.677	0.385	0.059	0.982
P5c	0.91908	0.15490	1.07398	2.712	0.423	0.074	1.022
P5f	1.10877	-0.16481	0.94396	2.547	0.386	0.043	0.977
P6f	1.15127	0.00000	1.15127	2.630	0.429	0.058	1.028
P6c	0.97518	0.17609	1.15127	2.543	0.436	-0.004	1.040
P7f	1.27875	-0.22185	1.05690	2.697	0.421	0.026	1.004
P7c	1.51587	-0.73239	0.78348	2.759	0.409	0.065	1.025
P8F	1.14613	-0.15127	0.99486	2.680	0.371	0.035	0.951
P8C	1.10616	-0.14133	0.96484	2.590	0.384	0.033	0.968
Media	1.06585	-0.11424	0.95161	2.609	0.407	0.048	1.002
GOLFO DE STA CLARA							
G1f	1.60206	-0.84510	0.75696	1.905	0.895	0.172	1.021
G1c	1.29557	-0.47712	0.81845	1.823	0.787	0.329	1.091
G2f	1.06339	-0.13263	0.93076	1.476	0.534	0.164	1.292
G2c	1.04700	-0.21560	0.83140	1.671	0.607	0.237	1.194
G3f	0.98340	-0.15761	0.82579	1.850	0.653	0.159	1.050
G3c	0.95707	-0.14976	0.80731	1.637	0.547	0.129	1.101
G4f	1.01981	-0.12494	0.89487	1.629	0.534	0.178	1.108
G4c	1.39043	-0.33099	1.05944	1.340	0.356	0.030	0.958
G5f	1.42867	-0.60206	0.82661	1.679	0.576	0.286	1.190
G5c	1.20412	-0.38021	0.82391	1.582	0.554	0.179	1.132
G6f	1.19033	-0.44716	0.74317	1.720	0.571	0.042	1.061
G6c	1.10551	-0.41218	0.69333	1.677	0.479	0.115	1.044
Media	1.15536	-0.32793	0.82742	1.666	0.591	0.168	1.103
PUERTO PEÑASCO							
Pe1f	1.13672	-0.23045	0.90627	1.602	0.732	-0.184	1.187
Pe1c	1.19312	-0.11394	1.07918	1.346	0.772	-0.206	1.035
Pe2f	1.08715	0.05115	1.13830	1.477	0.702	-0.090	1.196
Pe2c	1.70472	-0.52288	1.18184	1.693	0.700	-0.051	1.246
Pe3f	0.90943	0.15127	1.06070	1.793	0.977	-0.167	0.955
Pe3c	1.46240	0.30103	1.76343	1.967	0.871	-0.320	1.194
Pe4f	0.83815	0.10914	0.94729	1.876	0.741	-0.123	1.085
Pe4c	0.95078	0.14613	1.09691	2.137	0.603	-0.121	1.190
Pe5f	1.11998	-0.10474	1.01524	2.031	0.616	-0.131	1.160
Pe5c	1.39794	-0.25527	1.14267	2.308	0.498	0.022	1.039
Pe6f	1.56229	-0.09691	1.46538	1.808	0.931	-0.208	1.060
Pe6c	0.88349	0.02633	0.90982	1.900	0.946	-0.301	1.167
Media	1.12721	-0.02385	1.10336	1.828	0.757	-0.157	1.126

Así, la figura 13 resume los factores para el análisis discriminante el cual nuevamente indica la diferencia significativa de las dunas de Puerto Peñasco y El Pinacate sobre el resto de las localidades.



SRC = SAN LUIS RÍO COLORADO, P = PINACATE, GSC = GOLFO DE SANTA CLARA, PP = PUERTO PEÑASCO.

Figura 13. Análisis canónico discriminante.

ANÁLISIS DE CONGLOMERADOS

En la gráfica del análisis de conglomerado (Figura 14) podemos observar como las muestras de las cuatro localidades se asocian de acuerdo a la composición química de elementos mayores (22 muestras). En ambas gráficas la localidad de Puerto Peñasco presenta una composición química distinta. El CIA a su vez es el menor de las cuatro localidades. Esto indica que las arenas del desierto están más intemperizadas que en la costa. En la costa el sedimento es fresco. Golfo de Santa Clara, el Pinacate y San Luis Río Colorado también se

separan parcialmente en la grafica de conglomerados, existiendo relación entre las transiciones de las localidades, por las características químicas de elementos mayores. Identificado fuentes de sedimento, compartidas entre el Pinacate y el Golfo de Santa Clara; entre San Luis Río Colorado y el Pinacate; y finalmente entre Golfo de Santa Clara y San Luis Río Colorado. El Cluster propuestos por Tryon (1939) nos acerca a la agrupación entre los grupos, identificando las relaciones desde el punto de vista químico entre las localidades. El grupo que discrimina mediante este análisis es Puerto Peñasco debido a mayor contenido de cuarzo, sedimento más fresco químicamente, ambiente costero de alta energía, con fuentes de sedimento costero y fluvial procedentes del SE y ocasionalmente sedimento procedente del Desierto de Altar al NW. Esto produce una composición heterogénea. En contraste, el Golfo de Santa Clara presenta un sistema de fuentes del delta y del desierto con una probabilidad mayor de sedimento más homogéneo, procedente del sedimento relicto del delta, más que del desierto. El Pinacate también se separa pero queda contenido dentro de las otras localidades, mostrando la relación eólica existente entre las localidades del desierto, entre San Luis Río Colorado y el Pinacate con el régimen de vientos dominantes. San Luis Río Colorado también tiene relación con el Pinacate y el Golfo de Santa Clara presentando su agrupación a un extremo del eje longitudinal de la gráfica. Estas localidades comparten una fuente eólica, probablemente sedimento del Delta del Colorado, sedimento de la playa y poca influencia fluvial reciente.

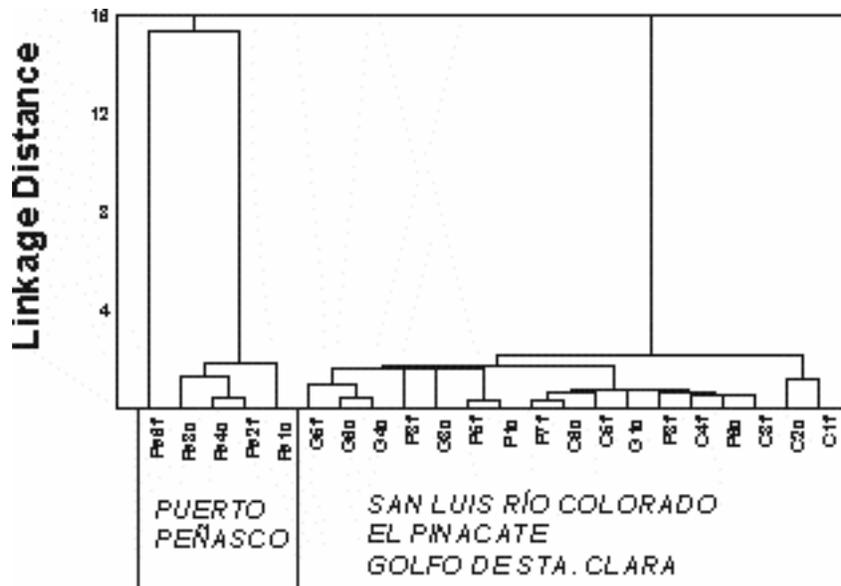


Figura 14. DENDROGRAMA DEL ANÁLISIS DE CONGLOMERADOS DE LOS DATOS GEOQUÍMICOS.

IV. CONCLUSIONES

Los procesos de transporte y depositación identificados en cada localidad participan en el aporte de sedimento al área de estudio. Estos procesos pueden asociarse con las distribución granulométrica, la petrología y la composición química de elementos mayores de las arenas. Además, están asociadas a estas características, las unidades de roca presentes en el área de estudio y fuera de ésta en la zona de influencia.

A lo largo del cauce del Río Colorado desde San Luis Río Colorado hasta su desembocadura en el Golfo de Santa Clara, sobre la planicie del delta, el sedimento es transportado por vientos del NW y procede de regiones más al norte del desierto y del Batolito del Norte de Baja California. Tanto en el Golfo de Santa Clara como en San Luis Río Colorado el viento transporta también sedimento relicto, procedente de la planicie del delta, depositado por las ancestrales descargas del Río Colorado. El Río Colorado no tienen descargas que aporten cantidades considerables de sedimento actualmente. Con ello podemos observar que en San Luis Río Colorado el proceso de formación principal es el viento, sin embargo existe transporte de sedimento dentro del delta, debido a las corrientes efímeras que se originan sobre el delta en época de lluvias. En el Golfo de Santa Clara están involucrados las corrientes marinas por mareas, el viento y las corrientes efímeras que se originan sobre el delta en época de lluvias y que descargan en la desembocadura del delta en el Golfo de Santa Clara. En el Alto Golfo de California existe un régimen de corrientes descendente de N a S durante noviembre, lo que probablemente influya en la circulación de sedimento del Golfo de Santa Clara hacia Puerto Peñasco durante el mes de noviembre. En Puerto Peñasco el sedimento es transportado por las corrientes marinas, las descargas fluviales que se originan en las unidades de roca en época de lluvias y por los vientos del NW.

En el Pinacate los granos presentes son los más finos, debido probablemente por la selectividad del viento. Por otro lado en San Luis Río Colorado se observan granos más gruesos, lo que se debe probablemente a la combinación de sedimento relicto del delta del Río Colorado con sedimento reciente transportado por el viento del NW. En el Golfo de Santa Clara observamos granos más grueso que en San Luis Río Colorado, debido principalmente a una composición de sedimento procedente del delta del Río Colorado y de la playa.

En función de los contenidos de cuarzo y feldespatos, las arenas de las cuatro localidades son maduras. Las dunas desérticas están composicionalmente influidas por la selectividad del viento en concentrar más cuarzo que las dunas costeras. Las dunas costeras están relativamente más influidas por biógenos. Sin embargo y paradójicamente cuando se observan las proporciones en terrígenos, las dunas de Puerto Peñasco son más ricas en cuarzo (Puerto Peñasco) debido a la alta energía (mareas, vientos) del área seguidas de El Pinacate y el Golfo de Santa Clara. Las dunas están influidas por líticos sedimentarios que están ligados a la fuente mayoritaria de las dunas: el Delta del Colorado y aluviones cuaternarios.

La composición geoquímica de las dunas indica que las cuatro regiones son químicamente similares. Los valores de índice de alteración química (CIA) sugieren que las dunas desérticas están más intemperizadas que las dunas costeras debido a que estas últimas tienen mayor variabilidad en K_2O y Na_2O , resultando en valores bajos del CIA.

Al utilizar modelos probabilísticos multivariados, como lo son las elipses en diagramas ternarios, la interpretación petrográfica y geoquímica se acerca más a un modelo cuantitativo más realista sobre la composición sedimentológica de las dunas. Este método cuantifica las relaciones matemáticas con bases estadísticas rigurosas.

Del análisis discriminante multivariado se observa que las variables que más discriminan entre los grupos de dunas son el tamaño de grano y la asimetría. El grupo que tiene una mejor separación del resto es El Pinacate. El análisis de conglomerado indica que Puerto Peñasco tiene relativamente una composición diferente al resto de los grupos posiblemente por la diversidad de feldespato de K y Na.

RECOMENDACIONES

IMPACTO AMBIENTAL

Al cesar las descargas del Río Colorado, la tasa de sedimentación del Río disminuyó casi en su totalidad. Lo anterior ha influenciado la composición sedimentológica de las dunas ubicadas en el delta y en la costa. El sedimento fluvial, antes aportado por el Río Colorado, es remplazando actualmente por sedimento eólico del desierto procedente del NW. De acuerdo con lo anterior, deben existir implicaciones ambientales y ecológicas en los servicios ambientales proporcionados por el sistema de dunas; debidas específicamente al cambio de sedimento fluvial por sedimento eólico, disminuyendo el aporte de minerales al suelo. Lo que influye en la degradación del suelo.

En San Luis Río Colorado se ha intensificado la actividad agrícola e industrial. La composición química del sedimento puede estar influenciada por la actividad agrícola o industrial de la zona; lo que tendría, al igual que en el párrafo anterior, implicaciones ambientales y ecológicas en los servicios ambientales proporcionados por el sistema de dunas.

Por lo anterior recomiendo realizar un análisis químico de elementos traza y tierras raras a detalle en las cuatro localidades para evaluar la influencia antropogénica en la composición de las arenas.

V. AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Juan José Kasper-Zubillaga por la dirección de esta tesis. Al Dr. Arturo Carranza-Edwards por sus comentarios y revisión de la tesis. Al Dr. Adolfo Gracia-Gasca por su apoyo y consejos dentro del Instituto. A Adriana Vega García y a Eduardo Morales de la Garza, del Laboratorio de Sedimentología de Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, por el análisis granulométrico de las muestras de arena. A la M en C Patricia Girón del Laboratorio de fluorescencia de rayos x del Instituto de Geología por su colaboración en los análisis de elementos mayores. Al Dr. Gert Jan Weltje, del Departamento de Ciencias de la Tierra Aplicadas, de la Universidad de Tecnología de Delf, Holanda, por enviar el algoritmo de las elipses en diagramas ternarios. Al Dr. Masatoshi Honda del Instituto para la Investigación de Frontera sobre la Evolución de la Tierra de la Agencia Japonesa para las Ciencias del Mar y la Tierra y Tecnología, por las aclaraciones relativas al calculo del índice de alteración química CIA.

VI. REFERENCIAS

BIBLIOGRÁFICAS

1. **Abuodha, J.O.Z.**, 2003, Grain size distribution and composition of modern dune and beach sediments, Malindi Bay coast, Kenya: *Journal of African Earth Sciences*, 36, 41-54.
2. **Aitchison, J.**, 1986, *The Statistical Analysis of Compositional Data*. Chapman and Hall, London, 416 pp.
3. **Allison, E.C.** , 1964, Geology of the area bordering the Gulf of California. *Marine Geology of the Gulf of California : A Symposium*, van Andel, T.J., Shor, G.G. (Eda), AAPG. Mem. 3, 216-310.
4. **Álvarez-Borrego, S.**, 1983 , Gulf of California. In: Ketchum, B.H. (Ed), *Estuaries and Enclosed Seas. Ecosystems of the World 26*. Elsevier, New York, pp. 427-449.
5. **Bagnold, R.A.**, 1941, *Physics of Blown Sand and Desert Dunes*, Methuen, London, 256 pp.
6. **Bagnold, R.A.** , **Barndorff-Nielsen, O.E.**, 1980, The pattern of natural size distributions: *Sedimentology*, 27, 199-207
7. **Basu, A.** , **Young, S.W.** , **Suttner, L.J.** , **James, W.C.** , **Mack, G.H.** , 1975 , Re-evaluation of the use of undulatory extinction and polycrystallinity in detrital quartz for provenance interpretation. *J. Sediment. Petrol.* 45, 873-882.
8. **Blount, G.** and **Lancaster, N.** , 1990 , Development of the Gran Desierto sand sea, northwestern Mexico. *Geology*, 18, 724-728.
9. **Bullard, J.E.** and **White, K.** , 2002 , Quantifying iron oxide coatings on dune sands using spectrometric measurements: An example from the Simpson-Strzelecki Desert, Australia. *Journal of Geophysical Research*, 107, No.B6, ECV5-1-ECV5-10.
10. **Carranza - Edwards, A.**, 2001, Grain size and sorting in modern sands: *Journal of Coastal Research*, 17: 38-52.
11. **Carranza-Edwards, A.**, **Centeno-García, E.**, **Rosales-Hoz, L.**, **Lozano-Santa Cruz, R.**, 2001, Provenance of beach gray sands from western México. *Journal of South American Earth Sciences*. 14, 291-305.
12. **Carriquiry, J.D.**, **Sánchez, A.**, **Camacho-Ibar, V.F.** , 2001 , Sedimentation in the northern Gulf of California after cessation of the Colorado River discharge. *Sedimentary Geology*, 144, 37-62.
13. **Carter, R.W.G.**, **Nordstrom, K.F.**, **Psuty, N.P.**, 1990. *The Study of Coastal Dunes*. En *Coastal Dunes, Form and Process* (Editores Nordstrom, K.F., Psuty, N & Carter, B.) Wiley & Sons, Chichester, p.392.

14. **Clarke, M.L. and Rendell, H.M.** , 1998 , Climate Change Impacts on sand supply and the formation of desert sand dunes in The South-West USA, *Journal Of Arid Environments*, 39, 517-531.
15. **Folk, R.L.**, 1971, Longitudinal dunes of the Northwestern edge of the Simpson Desert, Northern Territory, Australia. *Geomorphology and grain size relationship. Sedimentology*, 16, 5-54.
16. **Folk, R.L. and Ward, W.C.** , 1957 , Brazos River bar – A study in the significance of grain – size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, v.27, n.1,3-27.
17. **Han, M., Wu, L., Liu, Y.**, 2000, Adverse Impacts of Human Development on China's Coastal Area : management Issues and Implications, *International Coastal Symposium, Challenges for the 21st. Century in Coastal Science, Engineering and Environment* , 564 –572.
18. **Harrell, J. & Blatt, H.**, 1978, Polycrystallinity: effect on the durability of detrital quartz. *Journal of Sedimentary Petrology* 48: 25-30.
19. **Honda, H., Yabuki, S., Shimizu, H.**, 2004, Geochemical and isotopic studies of Aeolian sediments in China. *Sedimentology*, 51, 211-230.
20. **Honda, H. & Shimizu, H.**, 1998, Geochemical, mineralogic and sedimentological studies on the Taklimakan Desert Sands. *Sedimentology*, 45, 1125 - 1143.
21. **Ingle, J.C.** ,1982, Microfaunal evidence of age and depositional environments of the Cerro Prieto section (Plio-pleistocene), Baja California, Mexico. Berkeley, California, Lawrence Berkeley Laboratory, LBL-13897, 27 p.
22. **Ives, R.L.** ,1959, Shell dunes of Sonora shore. *American Journal of Science*, v.257, p.449-457.
23. **Jenks, G.K. & Brake, L.A.**, 2000, Enhancing Dune function and Landscape Integrity using active and Passive Bio-engineering, Bay of Plenty Coast, New Zeland. *International Coastal Symposium, Challenges for the 21st. Century in Coastal Science, Engineering and Environment*, 528 –534.
24. **Kasper-Zubillaga, J.J. and Carranza-Edwards A.** , 2003, Modern sands of the Gulf of Mexico: Discriminating fluvial and coastal composition. *Ciencias Marinas*, 29(4B), 621-630.
25. **Kasper-Zubillaga, J.J. and Dickinson, W.W.**, 2001, Discriminating depositional environments of sands from modern source terranes using modal analysis. *Sedimentary Geology*, 143, 149-167.
26. **Kasper-Zubillaga, J.J., Carranza-Edwards A., Rosales-Hoz L.**, 1999, Petrography and geochemistry of holocene sands in the western Gulf of Mexico: implications for provenance and tectonic setting. *Journal of Sedimentary Research*, 69, No.5,1003-1010.
27. **Keller, E.A.** , 1992 , *Environmental Geology* 6thEd., University of Carolina, Santa Barbara, USA.

28. **Komar, P.D.** , 1976 , Beach Processes and Sedimentation. Prentice Hall, New Jersey, 429 pp.
29. **LEGEPA** , 1990, Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Medio Ambiente. México.
30. **Lancaster, N.**, 1995 , Geomorphology of Desert Dunes. Routledge, London. 290 pp.
31. **Lancaster, N.** , 1992 , Relations between dune generation in the Gran Desierto of México. *Sedimentology* 39, 631-644.
32. **Lancaster, N.** , 1990 , Development of the Gran Desierto sand sea, northwestern Mexico. *Sedimentology*, 81, 115 - 122.
33. **Lancaster, N.** , 1989 , The dynamics of star dunes : An example from the Gran Desierto, Mexico. *Sedimentology*, v.36, p. 273-290.
34. **Lancaster, N.** , 1988 , Controls of dune morphology in the Gran Desierto sand sea, Sonora, México. Association of American Geographers 1988 Annual Meeting Program and Abstracts, p.105.
35. **Lancaster, N., Greeley R., Christensen, P.R.** , 1987, Dunes of the Gran Desierto sand sea, Sonora, México. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 12, p.277-288.
36. **Legget, R.F. & Karrow, P.F.** , 1986, Geología aplicada al la Ingeniería Civil, Mc Graw-Hill , México.
37. **Le Pera, E. , Critelli, S.**, 1977, Sourceland controls on the composition of beach and fluvial sand of the northern Tyrrhenian coast of Calabria, Italy: implications for actualistic petrofacies. *Sedimentary Petrology* 110: 81-97.
38. **Le Pera, E. and Arribas, J.** , 2004, Sand composition in an Iberian passive-margin fluvial course: the Tajo River. *Sedimentary Geology*. 171. 261-281.
39. **Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Medio Ambiente.** México, 1990.
40. **Livingstone, I. , Bullard, J.E. , Wiggs, G.F.S. , Thomas, D.S.G.** , 1999, Grain size variation on dunes in the Southwest Kalahari, Southern Africa. *Journal of Sedimentary Research*, 69, 546-552.
41. **Livingstone, I.** , 1989, Temporal trends in grain size measures on a linear sand dune. *Sedimentology*, 36, 1017-1022.
42. **Lonsdale, P.**, 1989, Geology and Tectonic history of the Gulf of California . *The Geology of North America*, Wintener, E.L., Hussong, D.M., Decker, R.W. (Eds.), Geol. Soc. Americ. Bull. N, 499-521
43. **Mack, G.E.**, 1984, Exceptions to the relationships between plate tectonics and sandstone composition, *Journal of Sedimentary Petrology*, v. 54 p., 212-220.

44. **McBride, E.F., Abel-Wahab, A., McGilvery, T.A.**, 1996, Loss of san-size feldspar and rock fragments along the South Texas Barrier Island, USA. *Sedimentary Geology* 107: 37-44
45. **Merriam, R.**, 1969, Source of sand dunes of southeastern California and northwestern México. *Geological Society of American Bulletin*, v.80, p. 531-534.
46. **Moreno-Casasola, P.** , 2004, Las playas y dunas del Golfo de México. Diagnóstico Ambiental del Golfo de México (Ed. Caso, M, Pisanty, I , & Escurra, E.) Secretaria De Medio Ambiente y Recursos Naturales, Vol. 1, P. 491-520.
47. **Muhs, D.R. Reynolds, R.L., Been J., Skipp, G**, 2003, Eolian sand transport pathways in the southwestern United States: importance of the Colorado River and local sources: *Quaternary International*, 104, 3-18.
48. **Nesbitt, H.W. and Young, G.M.**,1996, Petrogenesis of sediments in the absence of chemical weathering: effects of abrasion and sorting on bulk composition and mineralogy. *Sedimentology*, 43, 341-358.
49. **Nesbitt, H.W. and Young, G.M.**,1989, Formation and diagenesis of weathering profiles. *Journal of Geology*, vol.97, p.129-147.
50. **Nesbitt, H.W. and Young, G.M.**,1984, Prediction of some weathering trends of plutonic rocks and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v.48, p.1523-1534.
51. **Nesbitt, H.W. and Young, G.M.** , 1982, Early proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of Lutites. *Nature*,299, 715-717.
52. **Norman, L. and Clive, G.** , 2000, Environmental Assessment in Developing and Transitional Countries, Principles, Methods and Practice, University of Manchester, UK
53. **Norrish, K. and Chappell, W.B.**, 1977, X-ray fluorescence spectrography. In : *Physical Methods in Determinative Mineralogy* (Ed. By J. Zussman),pp. 161-214. Academic Press, London.
54. **Norrish, K. and Hutton, J.T.**, 1969, An accurate X-ray spectrographic method for the analysis of a wide range of geological samples. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 33, 431-453.
55. **Ortlieb, L.** , 1991, Sediemntology and stratigraphy of the Amazon continental Shelf. *Oceanography*. 4. 33-38.
56. **Pettijohn, F.J., Potter, P.E. & Siever, R.**, 1972, *Sands And Sandstones* Springer Verlag, New York, 618 P.
57. **Pye, K. and Lancaster, N.**, 1993, Aeolian sediments, ancient and modern. *International Association of Sedimentologists* 16.
58. **Pye, K. and Mazzullo, J.**, 1984, Effects of tropical weathering on quartz grain shape: an example from northeastern Australia. *J Sediment Res* 64: 653-667.

59. **Pye, K.** and **Tsoar, H.**, 1990, *Aeolian Sand and Sand Dunes*: London, Hyman, 396.
60. **Reineck, H. E. & Singh, I.B.**, 1980 , *Depositional sedimentary environments*. Springer-Verlag, Berlin, 549 pp.
61. **Rooney, C.**, and **Basu, A.**, 1994, Provenance analysis of muddy sandstones: *Journal of Sedimentary Research*, v. A64, p. 2-7.
62. **Roser, B.P.** and **Korsh, R.J.** , 1986, Determination of tectonic setting of sandstone – mudstone suites using SiO₂ content an K₂O/Na₂O ratio. *Jour. Geology*, 94, No. 5, 635 - 650.
63. **Rudnick, R.L.** and **Fountain, D.M.** , 1995, *Rev. Geophys.* 33. 267-309.
64. **Ruiz-Vázquez, M.** y **González-Huesca, S.**, 2000, *Geología aplicada al Ingeniería Civil*. Limusa, México.
65. **Solís-Limón, M.F.**, 2003, *Caracterización y procedencia de las dunas que bordean al campo volcánico El Pinacate, Sonora*. Tesis de Maestría, Universidad de Sonora, México. P. 158.
66. **Stensrud, D.J.**, **Gall R.L.**, **Nordquist, M.K.**, 1997, Surges over the Gulf of California during the Mexican Monsoon. *Mon. Weath. Rev.* 125, 417-437.
67. **Swan, A.R.H.** & **Sandilands, M.**, 1995, *Introduction To Geological Data Analysis*. Blackwell Science, Oxford, 446p.
68. **Sweet, M.L.**, **Nielson J.**, **Havholm, K.**, **Farrelley, J.**, 1988, Algodones dune field of southeastern California: Case history of a migrating modern dune field. *Sedimentology*, 35, 939-952.
69. **Taylor, S.R.** and **McLennan, S.M.**, 1985, *The Continental Crust: its composition and evolution*. Blackwell Scientific Publishers, Oxford; Taylor S.R. and S.M. McLennan (1995). *Rev. Geophys.* 33. 241-265.
70. **Tryon, R. C.** , 1939 , *Cluster Analysis*. Edwards Brothers.
71. **van Devender, T.R.**, **Thompson, R.S.**, **Betancourt, J.L.**, 1987, Vegetation history of the deserts of southwestern North America; the nature and time of the late Wisconsin-Holocene transition in Ruddiman, W.F., and Wright, H.E., Jr., eds., *North America and adjacent oceans during the last deglaciation*. Boulder, Colorado, Geological Society of America, v. K-3, p.323-351.
72. **Vezzoli, G.**, **Garzanti, E.**, **Monguzzi, S.**, 2004, Erosion In The Western Alps (Dora Baltea Basin) 1. Quantifying Sediment Provenance. *Sedimentary Geology*, 171, 227-246.
73. **Wang, X.**, **Dong, Z.**, **Zhang, J.**, **Qu, J.**, **Zhao, A.**, 2003, Grain size carachteristics of dune sands in the central Taklimakan Sand Sea. *Sedimentary Geology*, 161, 1-14.
74. **Weltje, G.J.**, 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.

75. **Winkler, C.D.** and **Kidwell, S.M.**, 1986, Paleocurrent evidence for lateral displacement of the Pliocene Colorado River delta by the San Andres fault system, southeastern California. *Geology*, v.14, p.788-791.
76. **Yang S., Jung H.S., Li, C.** ,2003, Two unique weathering regimes in the Changjiang and Huanghe drainage basins: geochemical evidence from river sediments. *Sedimentary Geology*. 164: 19-34.
77. **Zimbelman, J.R.** and **Williams, S.H.**, 2002, Geochemical indicators of separate sources for eolian sands in the eastern Mojave Desert, California, and western Arizona. *Geological Society of America Bulletin*, 114, No.4, 490-496.

CARTOGRAFÍA

78. **Pérez-Villegas G.**, 1990, Vientos Dominantes. Atlas Nacional de México (Wind Sheet IV.4.2): Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

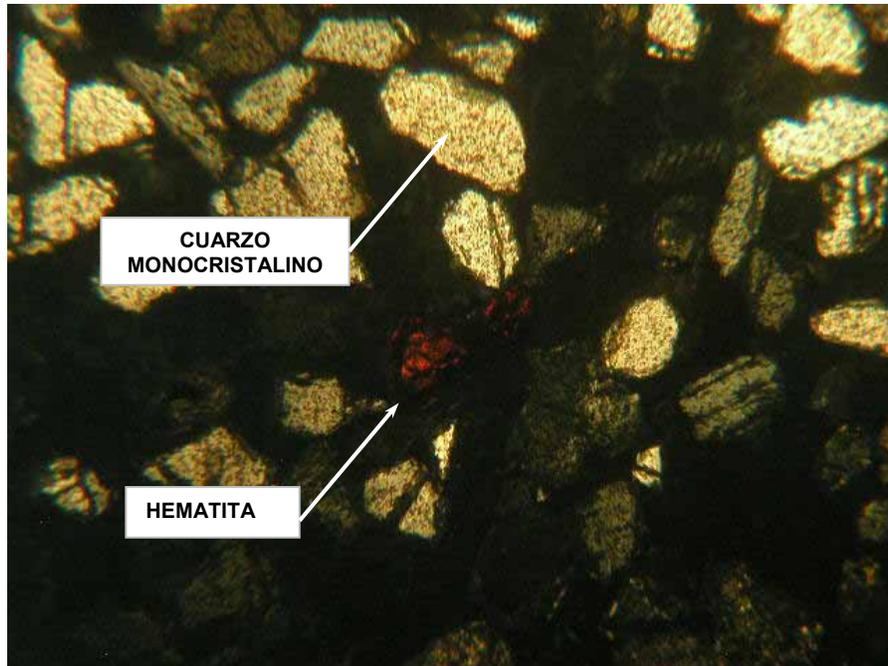
INTERNET

78. United States Geological Survey :
<http://geology.wr.usgs.gov/docs/usgsnps/coast/sand/calcsand.html>
<http://pubs.usgs.gov/gip/deserts/types/>

VII. ANEXO

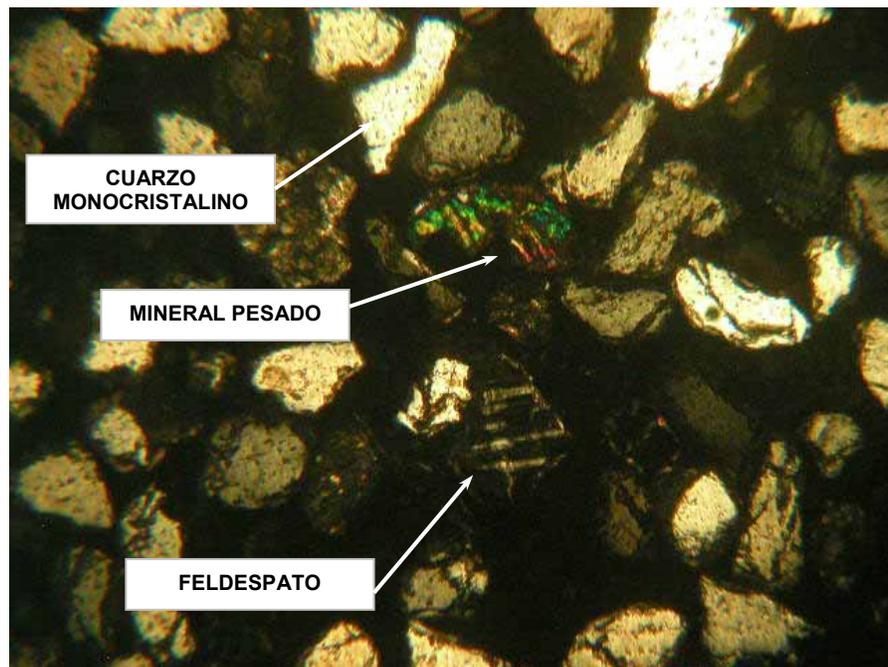
Fotografías de láminas vistas en el microscopio petrográfico con objetivo 10 x.

EL PINACATE



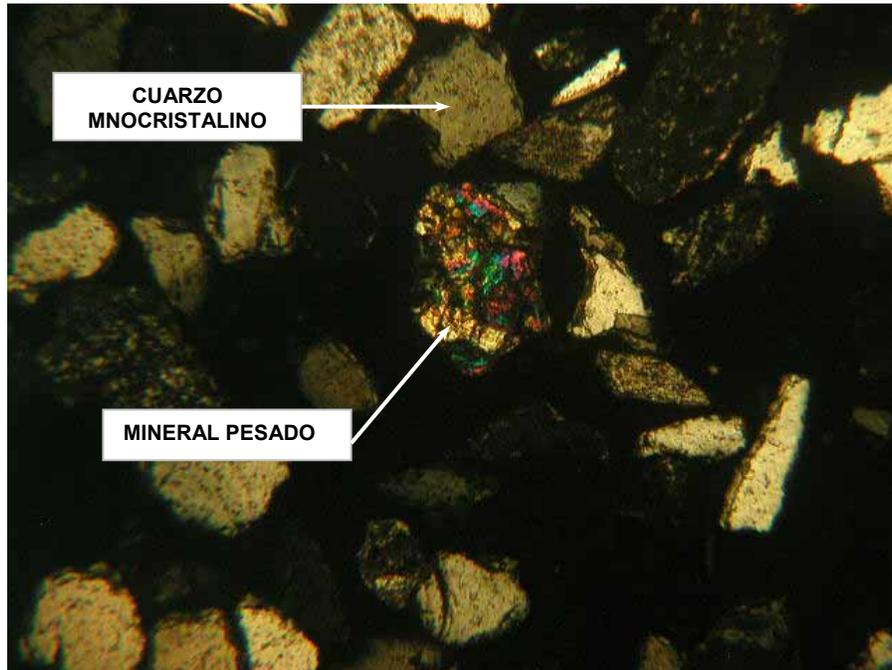
Fotografía 1

EL PINACATE



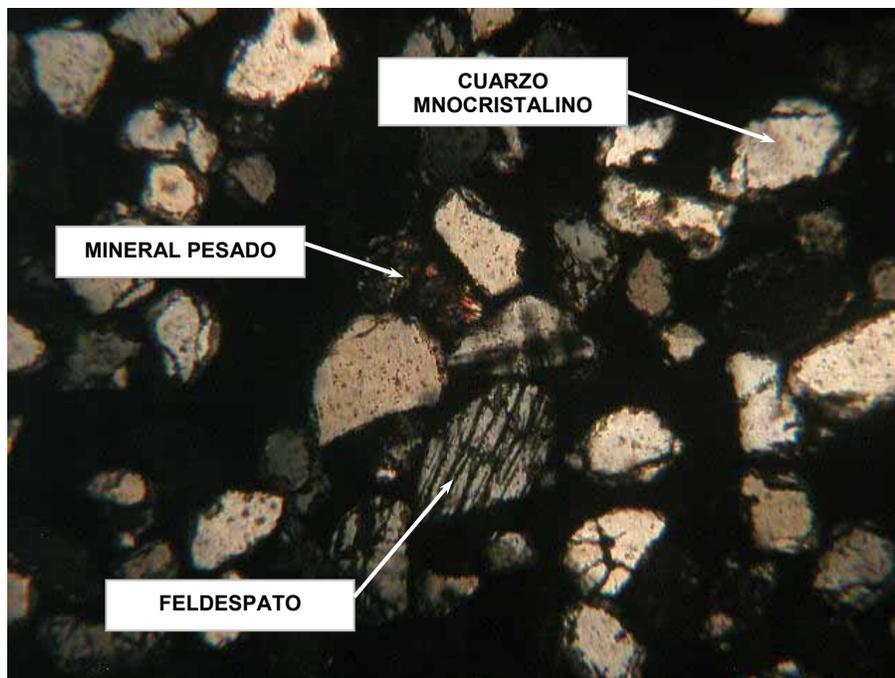
Fotografía 2

EL PINACATE



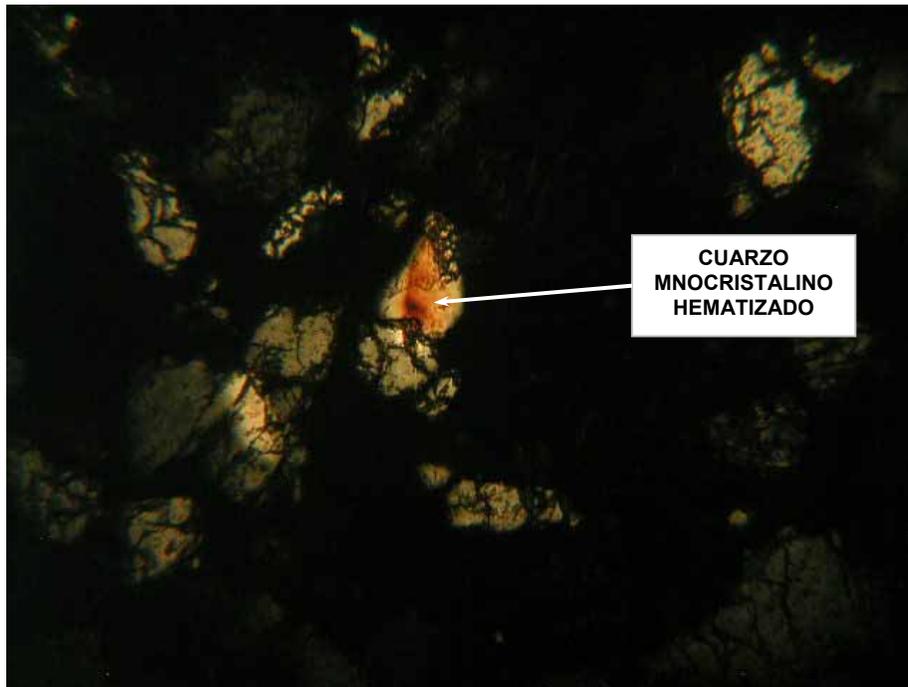
Fotografía 3

SAN LUIS RÍO COLORADO



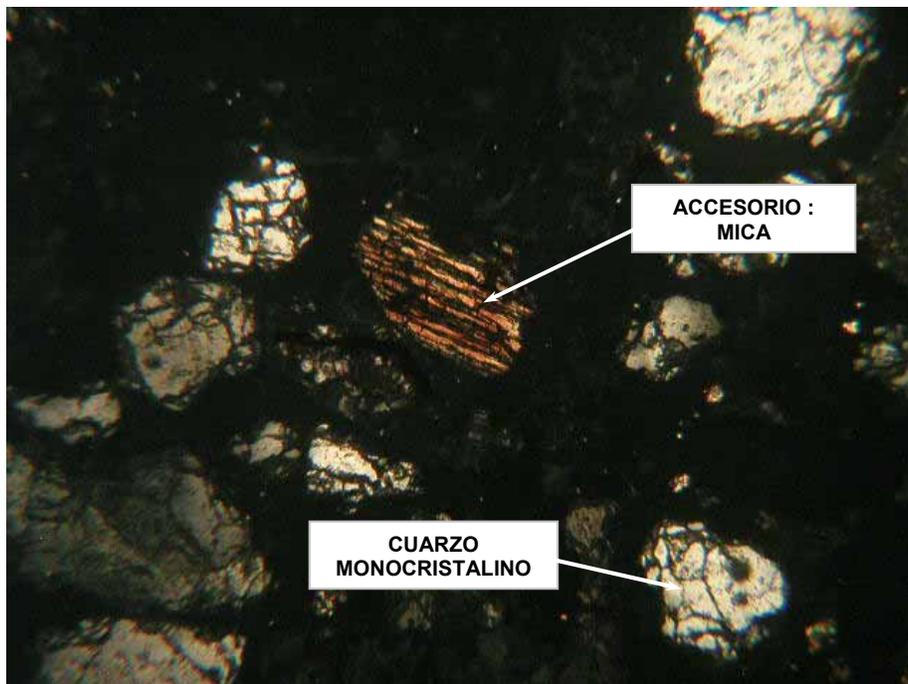
Fotografía 4

SAN LUIS RÍO COLORADO



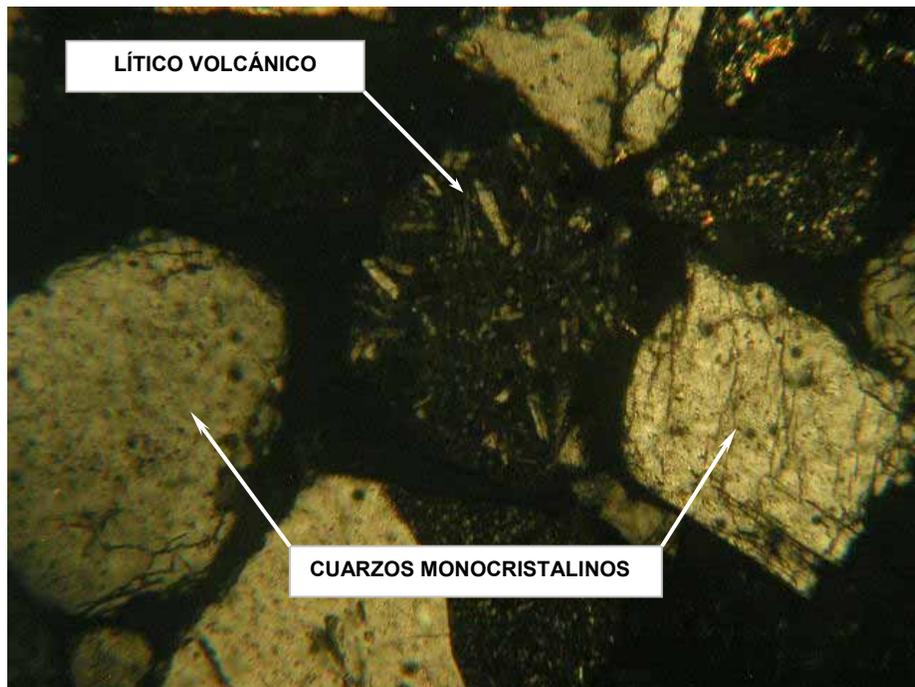
Fotografía 5

SAN LUIS RÍO COLORADO



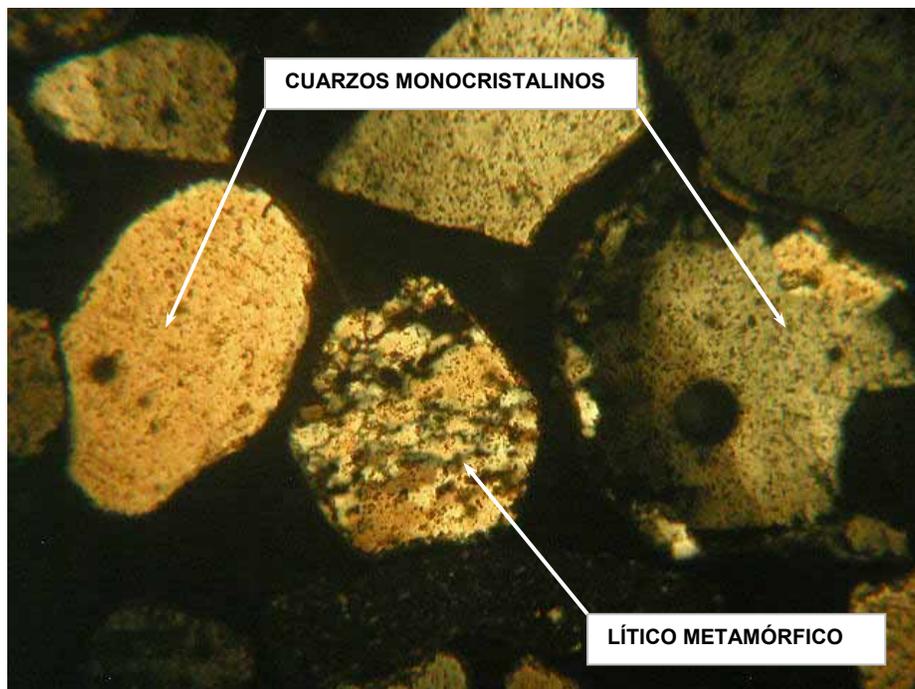
Fotografía 6

GOLFO DE SANTA CLARA



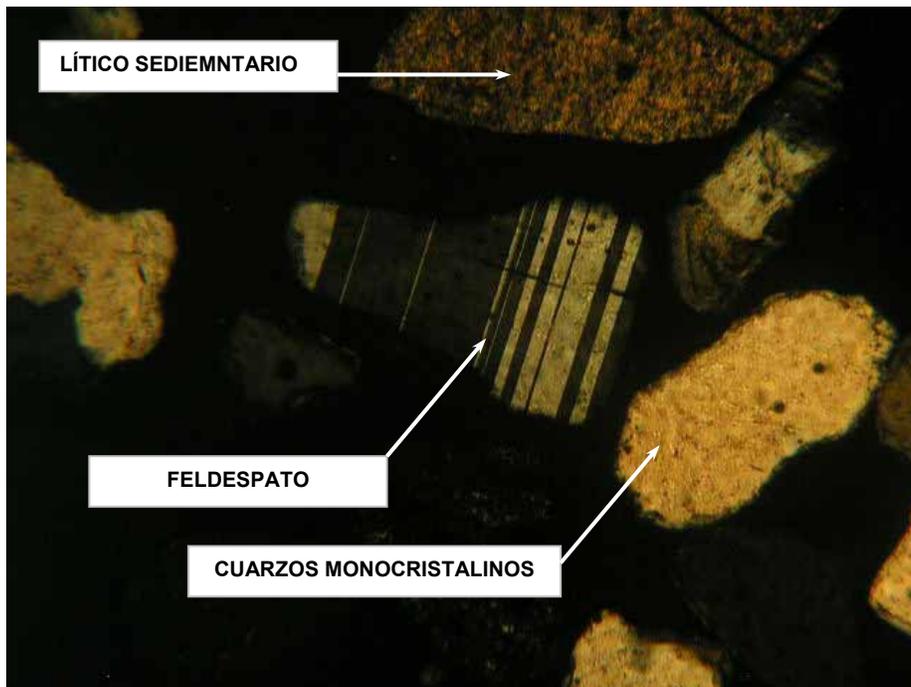
Fotografía 7

GOLFO DE SANTA CLARA



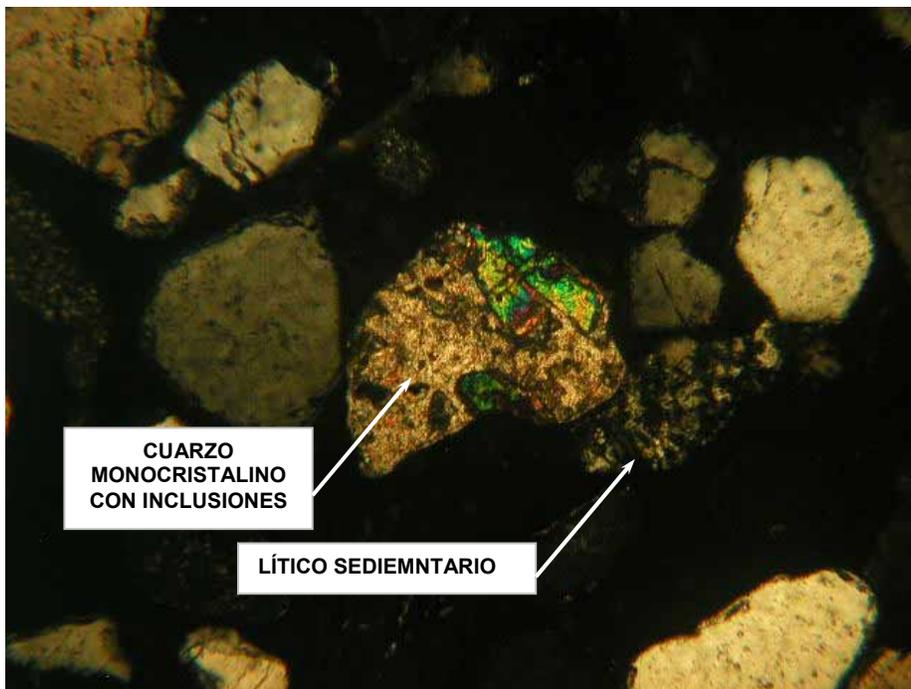
Fotografía 8

GOLFO DE SANTA CLARA



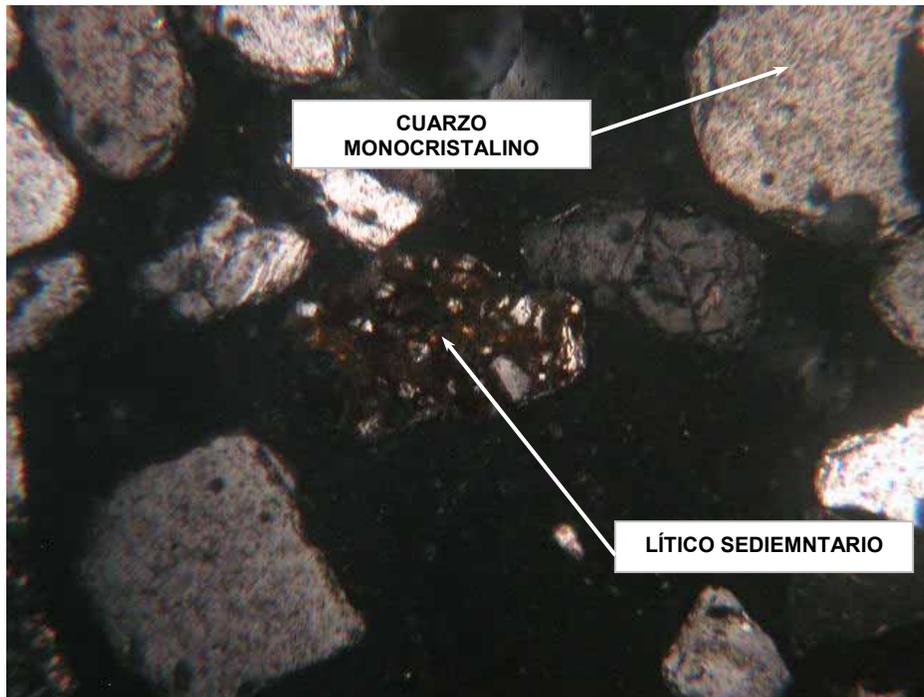
Fotografía 9

GOLFO DE SANTA CLARA



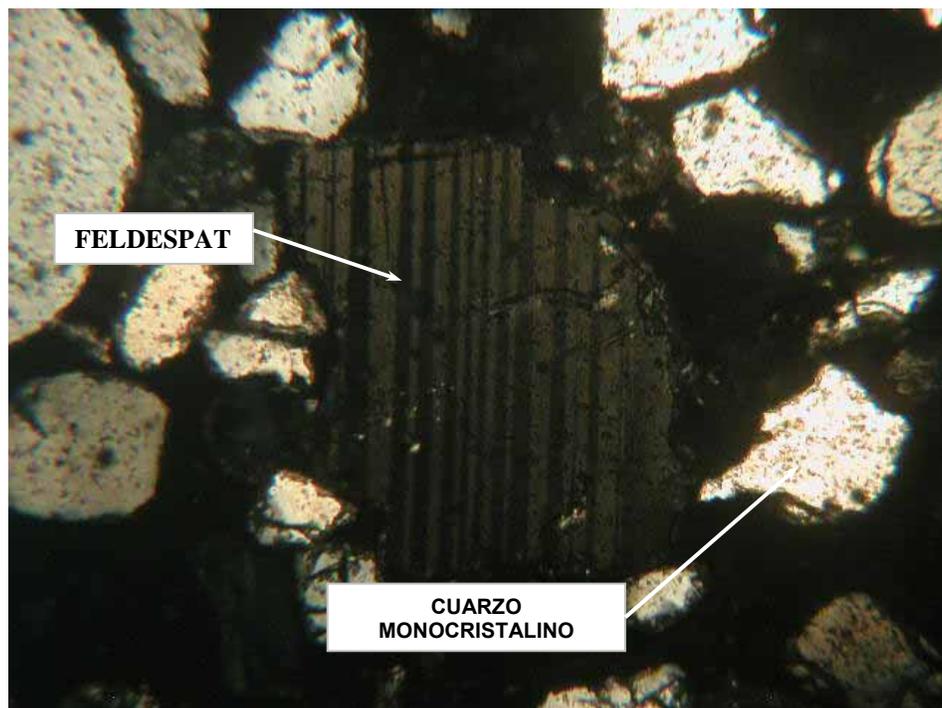
Fotografía 10

PUERTO PEÑASCO



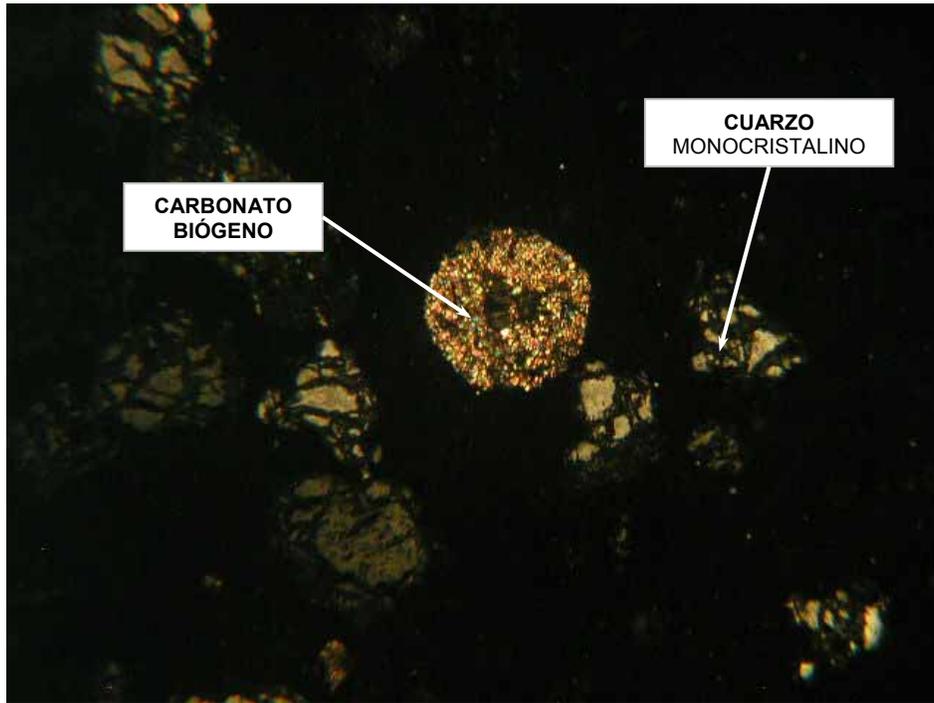
Fotografía 11

PUERTO PEÑASCO



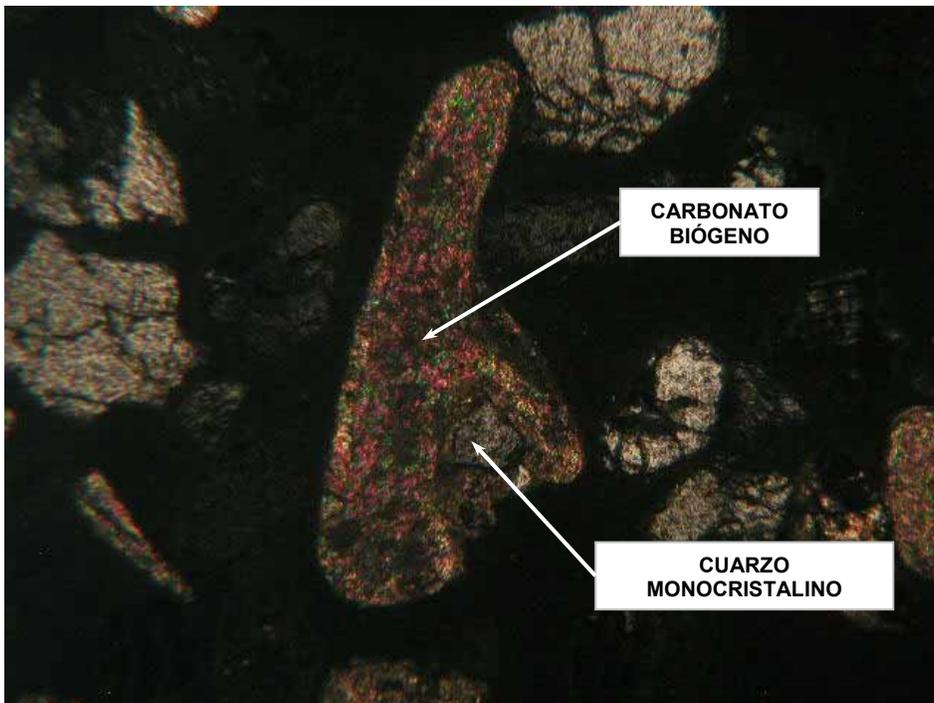
Fotografía 12

PUERTO PEÑASCO



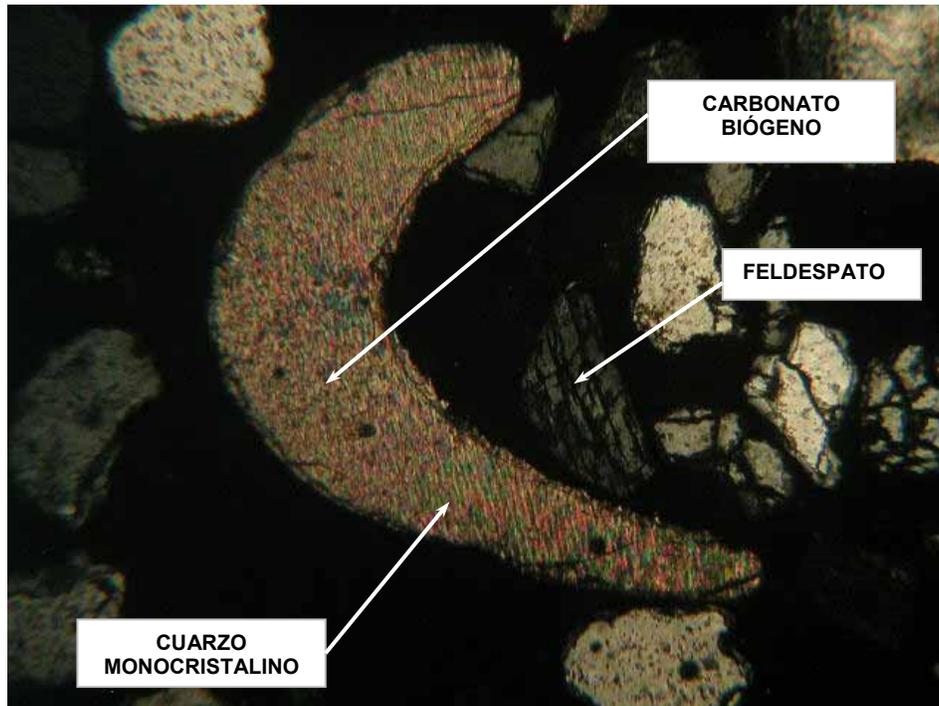
Fotografía 13

PUERTO PEÑASCO



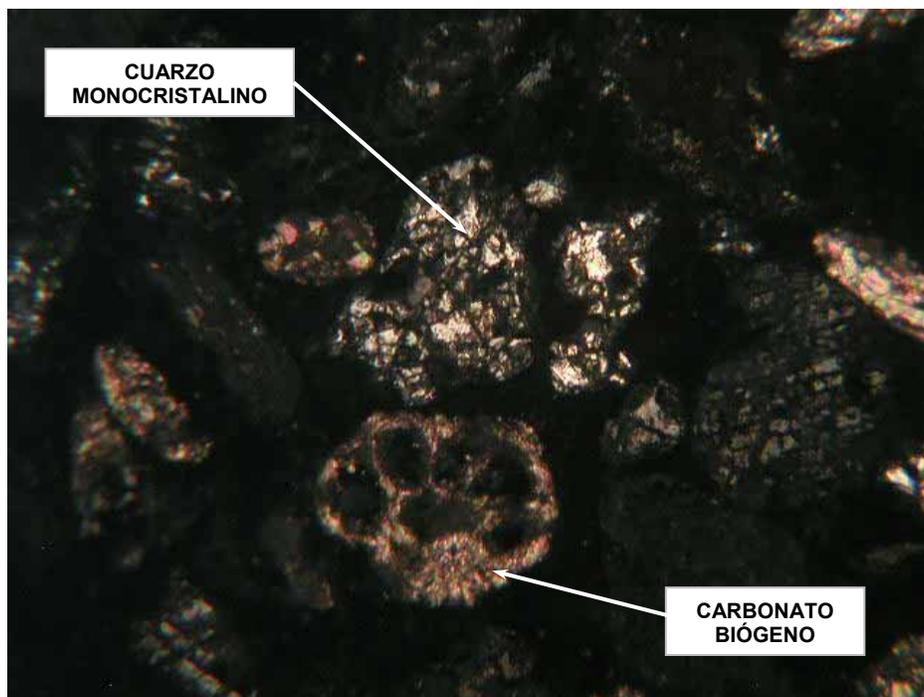
Fotografía 14

PUERTO PEÑASCO



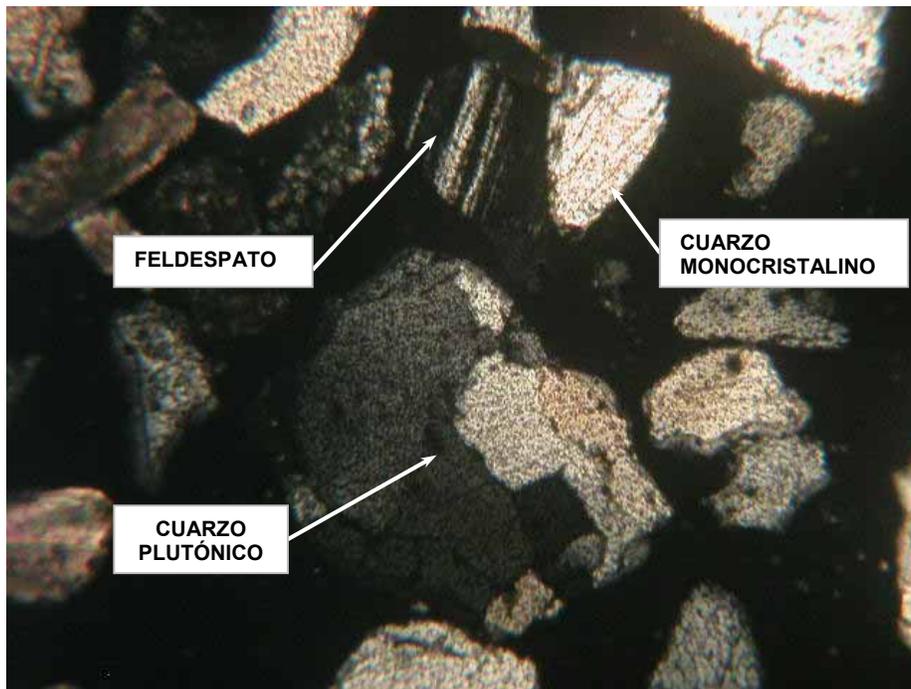
Fotografía 15

PUERTO PEÑASCO



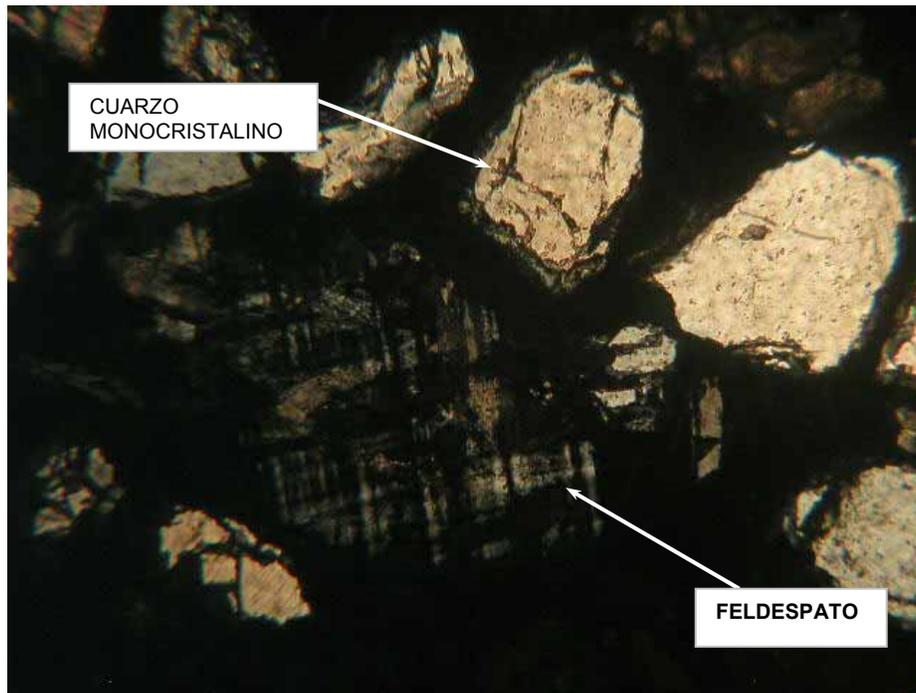
Fotografía 16

PUERTO PEÑASCO



Fotografía 17

PUERTO PEÑASCO



Fotografía 18