



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA

***ANÁLISIS COMPOSICIONAL DE SEDIMENTOS RECIENTES EN LAS PLAYAS
DE TAMIAHUA Y TUXPAN, GOLFO DE MÉXICO: IMPLICACIÓN SOBRE SU
PROCEDENCIA***

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

(GEOLOGÍA MARINA)

PRESENTA:

ING. HÉCTOR JESÚS TAPIA FERNÁNDEZ

DIRECTOR DE TESIS

DR. JOHN S. ARMSTRONG ALTRIN, INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA

COMITÉ TUTORAL

DR. ARTURO CARRANZA EDWARDS, INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA

DR. JAIME URRUTIA FUCUGAUCHI, INSTITUTO DE GEOFÍSICA

DRA. OFELIA MORTON BERMEA, INSTITUTO DE GEOFÍSICA

DR. RAYMUNDO GERARDO MARTÍNEZ SERRANO, INSTITUTO DE GEOFÍSICA

MÉXICO D.F. JULIO 2013



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

Dedicatoria

A mi compañera de vida Idalid, quien me ha brindado su apoyo incondicional para poder culminar con éxito mis estudios de maestría.

A mis hijos Marián Izel y Héctor Xavier que son el motor de todo lo que hago.

A mi madre María Antonieta, quien siempre me ha apoyado y sobre todo creído en todas las decisiones que he tomado en mi vida.

A mis abuelos César y Socorro, gracias porque todavía tengo la fortuna de tenerlos

A mis suegros Eulalio y Elena por apoyarme en el cuidado de mis hijos.

A mi tíos Hilario y María, a mis primos Mauricio y Adriana por brindarme su apoyo durante mi estancia en la Ciudad de México.

Al Dr. John S. Armstrong-Altrin por su amistad y apoyo en este trabajo de investigación.

A todos los que hicieron más ameno mi camino, gracias Natalhy, Elisa, Toño, León, Leo, Celso, Hugo, y Alejandro.

Agradecimientos

Reitero mi agradecimiento al Dr. John S. Armstrong-Altrin por invitarme a trabajar con el, por la oportunidad de realizar esta tesis y por compartir sus conocimientos.

Gracias a los integrantes del comité tutor; Dr. Arturo Carraza Edwards, Dr. Jaime Urrutia Fucugauchi, Dra. Ofelia Morton Bermea y al Dr. Raymundo Martínez Serrano, por aceptar supervisar este trabajo así como por sus valiosas observaciones y comentarios.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por apoyar mis estudios de maestría otorgando una beca para mi manutención.

Agradezco al posgrado de Ciencias del Mar y Limnología y a todos los que fueron mis profesores.

Agradezco al proyecto institucional "Petrografía y geoquímica de sedimentos marinos del Golfo de México, México: Una herramienta para deducir ambientes sedimentarios, procedencia y procesos tectónicos en relación con su fuente de la región, número 616" para realizar el trabajo de campo; asimismo también agradezco al proyecto PAPIIT número IA101213 titulado "Petrografía y geoquímica de arenas de playas de diferentes ambientes tectónicos de México: implicaciones de procedencia" otorgados por el Dr. John S. Armstrong-Altrin con la finalidad de realizar el trabajo de campo y análisis geoquímicos.

Agradezco al M. en C. Eduardo Morales de la Garza y a Ricardo, del laboratorio de Sedimentología del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, por el apoyo en la realización de la granulometría.

Agradezco a la Dra. María Luisa Machaín Castillo por permitirme realizar trabajo y muestreo geológico en las campañas oceanográficas Facies I, Tehua X y Tehua XI a bordo de los buques oceanográficos Justo Sierra y El Puma respectivamente.

Agradezco al M. en C. Héctor Alexander Valdés del laboratorio de Físico-Química marina del ICMYL por permitir utilizar mobiliario del mismo en la molienda de muestras.

Al la Dra. Gloria Vilaclara Fatjó por su apoyo y al personal de la coordinación del posgrado en Ciencias del Mar y Limnología, Lupita, Chantal y Diana por su apoyo y orientación en los trámites escolares.

Finalmente agradezco a la máxima casa de estudios de este país, la UNAM, por darme la oportunidad de seguir mi desarrollo profesional, de seguir en el camino de aprendizaje y por otorgarme una educación de la más alta calidad.

INDICE DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	8
1.1 LOCALIZACIÓN Y VÍAS DE ACCESO AL ÁREA DE ESTUDIO	10
1.2 JUSTIFICACIÓN	11
1.3 OBJETIVOS	11
1.3.1 OBJETIVO GENERAL	11
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
1.6 ANTECEDENTES	12
2.1 CLIMA	15
2.2 FISIOGRAFÍA Y GEOMORFOLOGÍA	15
2.3 HIDROGRAFÍA	16
2.4 GEOLOGÍA REGIONAL	17
MATERIALES Y MÉTODOS	22
3.1 TRABAJO DE CAMPO	22
3.2 GRANULOMETRÍA	22
3.2.1 PARÁMETROS TEXTURALES	23
3.3 ANÁLISIS PETROGRÁFICO	26
3.4 GEOQUÍMICA	27
3.4.1 MÉTODOS ANALÍTICOS	28
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	32
4.1 GRANULOMETRÍA	32
4.1.1 PARÁMETROS TEXTURALES	32
4.2. AMBIENTE SEDIMENTARIO	35
4.4 PETROGRAFÍA	37
4.4.1 CONDICIONES PARA EL ENRIQUECIMIENTO EN CUARZO	39
4.5 GEOQUÍMICA	42
4.5.1 GEOQUÍMICA DE ELEMENTOS MAYORES	44
4.3.2 GEOQUÍMICA DE ELEMENTOS TRAZA	52
4.4.3 GEOQUÍMICA DE TIERRAS RARAS	59
4.3.4 CONDICIONES DE INTEMPERISMO QUÍMICO	64
4.4 PROCEDENCIA	65
4.4.1 PROBABLE ROCA FUENTE	69
CONCLUSIONES	72

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización del área de estudio.....	10
Figura 2. Hidrografía de la porción norte del estado de Veracruz.....	17
Figura 3. Mapa geológico del área de estudio.	21
Figura 4. Equipo Ro-Tap sieve Sha-ker.	23
Figura 5. Cuarteadores del Laboratorio de Sedimentología.....	23
Figura 6. Método de conteo por puntos.	26
Figura 7. Pulverizador Fritsch modelo Pulverisette 2 de mortero de ágata del Laboratorio de Físico-Química Marina del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología.	28
Figura 8. Equipo ICP-MS del Laboratorio de Geoquímica del Instituto de Geología de la UASLP.	30
Figura 9. a) Diagrama $Mz\phi$ contra $\sigma I\phi$ (Friedman, 1961); b) Diagrama SkI contra $\sigma I\phi$ (Friedman, 1967; Moiola y Weiser, 1968); c) Diagrama $Mz\phi$ contra σI (Friedman, 1961); d) Diagrama $Mz\phi$ contra SkI (Moiola y Weiser, 1968; Hails y Hoyt, 1969).	36
Figura 10. Diagrama ternario Ct-Ft-Lt (Folk, 1980)	39
Figura 11. Transporte litoral dominante en el Golfo de México (Modificado de Marín-Guzmán y Carranza-Edwards, 2011).	40
Figura 12. Diagrama normalizado de elementos mayores para las arenas de Playa de Tamiahua, Tuxpan y los ríos Tuxpan y Cazones, normalizados con el promedio de la corteza continental superior (Taylor y McLennan, 1985).....	44
Figura 13. Relación entre Al_2O_3/TiO_2 vs SiO_2 para las arenas de playa en Tamiahua y Tuxpan, así como los ríos Tuxpan y Cazones (Le Bas et al., 1986). n= número de muestras.	46
Figura 14. Diagrama binario SiO_2 vs Al_2O_3 para las arenas de Playa de Tuxpan, Tamiahua, ríos Tuxpan y Cazones.....	47
Figura 15. Diagrama binario K_2O vs Al_2O_3 para las arenas de Playa de Tuxpan, Tamiahua, ríos Tuxpan y Cazones.....	49
Figura 16. Diagrama binario TiO_2 vs Al_2O_3 para las arenas de Playa de Tuxpan, Tamiahua, ríos Tuxpan y Cazones.....	50
Figura 17. Diagrama binario Fe_2O_3 vs TiO_2 para las arenas de Playa de Tuxpan, Tamiahua, ríos Tuxpan y Cazones.....	51
Figura 18. Clasificación geoquímica de arenas de playa (Tuxpan, Tamiahua, Ríos Tuxpan y Cazones) usando $\log(Na_2O/K_2O)$ vs $\log(SiO_2/Al_2O_3)$ (Pettijohn et al., 1972).....	51
Figura 19. Diagrama normalizado multielementos para las arenas de playa de Tamiahua, Tuxpan, río Tuxpan y río Cazones; normalizados con el promedio de la corteza continental superior (Taylor y McLennan, 1985). 52	
Figura 20. Diagrama binario K_2O vs. Rb para las arenas de Playa de Tuxpan, Tamiahua, ríos Tuxpan y Cazones.....	55
Figura 21. Diagrama binario K_2O vs. Ba para las arenas de Playa de Tuxpan, Tamiahua, ríos Tuxpan y Cazones.....	56
Figura 22. Diagrama binario Hf vs. Zr para las arenas de Playa de Tuxpan, Tamiahua, ríos Tuxpan y Cazones.	57
Figura 23. Difractograma de la muestra THA9 de la playa de Tamiahua.	58
Figura 24. Difractograma de la muestra TX15 de la playa de Tuxpan.	58

Figura 25. Diagramas spider para las arenas de playa y río obtenidos con la normalización con valores condriticos y comparados con el promedio de la corteza continental superior (Taylor y McLennan, 1985) a) Tamiahua b) Tuxpan c) ríos Tuxpan y Cazones. 61

Figura 26. Diagrama ΣTR contra Al_2O_3 indicando las diferencias en las concentraciones de tierras raras de las arenas de playas de Tamiahua y Tuxpan y las de arena de los ríos Tuxpan y Cazones. 63

Figura 27. Diagrama Al_2O_3 contra tamaño grafico promedio ($Mz\phi$). 63

Figura 28. Diagrama binario ΣTR contra Zr para las arenas del presente estudio. 64

Figura 29. Diagrama de función discriminante para procedencia de sedimentos usando elementos mayores (Roser y Korsh, 1988). Las funciones discriminantes son: Función discriminante 1= $(-1.773 TiO_2) + (0.607 Al_2O_3) + (0.760 Fe_2O_3) + (-1.500 MgO) + (0.616 CaO) + (0.509 Na_2O) + (-1.224K_2O) + (-9.090)$. Función discriminante 2= $(0.445 TiO_2) + (0.070 Al_2O_3) + (-0.250 Fe_2O_3) + (-1.142 MgO) + (0.438 CaO) + (1.475 Na_2O) + (-1.426 K_2O) + (-6.681)$. ¹ Armstrong-Altrin et al. (2012); ² Ramírez-Munóz (2012). 65

Figura 30. Diagrama binario Th/Sc vs. Sc para muestras de arena. ¹ este estudio, ² corteza continental superior (CCS, McLennan, 2001); ³ granito, andesita y basalto (Condie, 1993); ⁴ diorita y granodiorita (Wang et al., 2003). 68

Figura 31. Diagrama ternario La-Th- Sc para muestras de arena. ¹ este estudio, ² corteza continental superior (CCS, McLennan, 2001); ³ granito, andesita y basalto (Condie, 1993); ⁴ diorita y granodiorita (Wang et al., 2003). 69

Figura 32. Áreas de estudio y localidades donde se compilo la base de datos geoquímica para comparar e identificar la procedencia de arenas de Tamiahua y Tuxpan. La fuente de datos para la procedencia son: 1) Rosales-Lagarde et al. (2005); 2) Verma (2001a); 3) Orozco-Esquivel et al. (2003); 4) Verma (2001b). 70

Figura 33. Patrones de tierras raras normalizados con condrita para las arenas de Tamiahua, Tuxpan, río Tuxpan y río Cazones; n=número de muestras; ² CCS (Promedio de la corteza continental; Taylor y McLennan, 1985); ³ Rosa-les-Lagarde et al. (2005); ³ Verma (2000; 2001a, 2001b); ⁴ Verma (2001a, 2001b); ⁵ Verma (2000; 2001a, 2001b); ⁶ Orozco-Esquivel et al. (2003); Wang et al., (2003); ⁸ Bogaerts et al., (2003). 71

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tamaño gráfico promedio ($Mz\phi$) para las arenas de playa de Tamiahua, Tuxpan, Ríos Tuxpan y Cazones. 32

Tabla 2. Desviación estándar gráfica inclusiva ($\sigma_1\phi$) par las arenas de Tamiahua, Tuxpan, Ríos Tuxpan y Cazones. 33

Tabla 3. Grado de asimetría (Sk_1) para las arenas de Tamiahua, Tuxpan, Río Tuxpan y Río Cazones. 34

Tabla 4. Curtosis (KG) para las arenas de Tamiahua, Tuxpan, Ríos Tuxpan y Cazones. 35

Tabla 5. Petrografía de las arenas de Tamiahua, Tuxpan, río Tuxpan y Cazones. 38

Tabla 6. Elementos mayores (%) en arenas de Tamiahua (THA), Tuxpan (TX), río Tuxpan (RTX) y río Cazones (RCAZ); $Mz\phi$ = Tamaño gráfico promedio; PXC= Pérdida por calcinación; CIA (Índice de alteración química). 45

Tabla 7. Concentraciones de elementos traza (en ppm). 53

Tabla 8. Concentraciones de tierras raras (en ppm). 60

INTRODUCCIÓN

| 1

Los estudios sedimentológicos de los litorales son importantes debido a que la playa es un ambiente que usualmente se encuentra en un delicado equilibrio dinámico. En este lugar tan estrecho se encuentra la interfaz entre la tierra, aire y agua, y se presenta la interacción entre diversos factores tales como la acción del oleaje, las corrientes litorales, tectónica, procesos de sedimentación, etc. Además, los estudios de los sedimentos recientes del Holoceno son usualmente usados en la investigación de rocas sedimentarias, ya que sus resultados pueden ser aplicados para comprender ambientes sedimentarios antiguos (Carranza-Edwards *et al*, 1994).

Las variaciones texturales, composicionales y geoquímicas de los sedimentos litorales se encuentran controladas por diversos factores como el oleaje, acción del viento, corrientes litorales, clima, relieve y la composición de la roca fuente (Folk, 1974; Komar, 1976; Carranza-Edwards y Rosales-Hoz, 1995; Carranza-Edwards, 2001; Kasper-Zubillaga y Carranza-Edwards, 2005). La composición y tamaño de grano de las arenas de playa dependen parcialmente de cuánto tiempo ha estado sujeta la costa a la erosión, ya que los procesos físicos que más afectan a las playas son el tipo del oleaje y corrientes litorales. Los procesos de transporte, los diferentes tipos de litologías y el relieve de las zonas fuente se encuentran parcialmente controladas por la tectónica regional.

La distribución de los tamaños de grano (granulometría), ha sido extensamente usada por los sedimentólogos para entender la dinámica del transporte. La distribución de los tamaños de grano de los sedimentos costeros se encuentra influenciada en gran parte por mecanismos de selectividad eólica y marina; por ejemplo los sedimentos arenosos se depositan en condiciones de intenso oleaje, mientras que los sedimentos constituidos por partículas finas (lodos) se depositan en aguas tranquilas. A si mismo, las diferencias entre

los tamaños de grano se relacionan con la fuente del material, la disponibilidad de arena y la distancia de transporte entre el área fuente y el ambiente de depósito.

La petrografía de las arenas modernas es usada para conocer las relaciones entre las zonas que proveen sedimento y la composición de las arenas (Ingersoll, 1978; Dickinson *et al*, 1983; Basu, 1985; Potter, 1986). El cuarzo es abundante en rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas, por tanto, es uno de los constituyentes detríticos más comunes en los sedimentos terrígenos (Petijohn *et al.*, 1975). Los contenidos de cuarzo, líticos y feldespatos son susceptibles a cambiar durante los ciclos de erosión, transporte y depositación (Crook, 1968).

Es común que los sedimentos costeros en general reflejen fuentes continentales, debido a que frecuentemente derivan de materiales que son intemperizados y transportados desde las tierras altas a través de los sistemas fluviales o de las corrientes litorales (Komar e Inman, 1970; Komar, 1976; McLennan, 1989; Carranza-Edwards y Rosalez Hoz, 1995; Kasper-Zubillaga y Carranza-Edwards, 2005).

Por esta razón, los sedimentos terrígenos como las arenas de playa son utilizados en estudios de procedencia, ya que suministran información valiosa acerca de la naturaleza del origen de la roca y del ambiente tectónico en el cual se formaron (Kasper-Zubillaga *et al.*, 1999; Kasper-Zubillaga y Dickinson, 2001; Armstrong-Altrin *et al.*, 2004).

La geoquímica de los sedimentos clásticos ha sido utilizada para determinar la composición de las áreas fuente (Cullers, 2000, 2002; Armstrong-Altrin, 2009), las características del intemperismo químico (Selvaraj y Chen, 2006) y la reconstrucción de la dinámica tectónica de las cuencas sedimentarias (Armstrong-Altrin y Verma, 2005). Sin embargo, las variaciones en la composición geoquímica de los sedimentos dependen de otros factores tales como el sorteo, diagénesis y el relieve. Las variaciones geoquímicas producidas por estos factores han sido estudiados por Weltje (2006) y Lee (2009).

1.1 LOCALIZACIÓN Y VÍAS DE ACCESO AL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio del presente trabajo de investigación; se encuentra en el extremo norte del estado de Veracruz, en la costa del Golfo de México, entre las coordenadas 21°16'36" N y 97°26'99" O.

Es posible llegar a las playas de Tamiahua y Tuxpan a través de la carretera No. 130, que conecta con la capital del país a una distancia aproximada de 325 km; primero hay que llegar al puerto de Tuxpan y posteriormente en dirección norte se encuentra la población de Tamiahua (Figura 1).

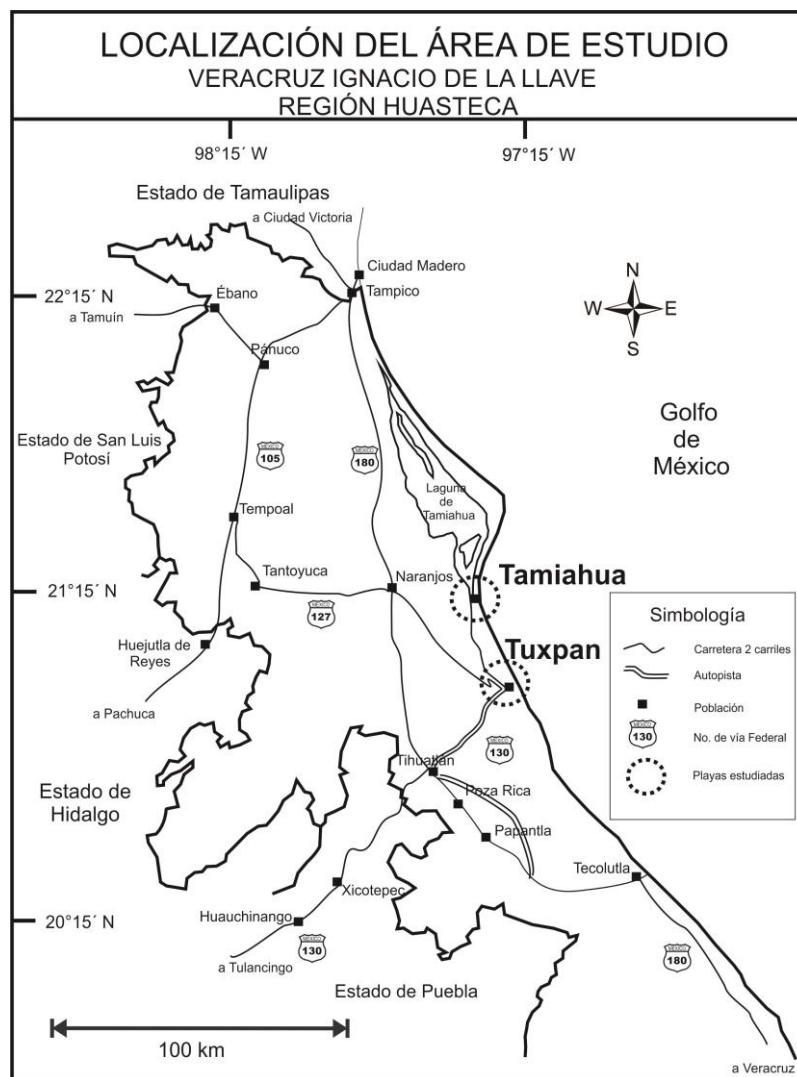


Figura 1. Localización del área de estudio.

1.2 JUSTIFICACIÓN

El presente estudio brindará información completa sobre:

Las características granulométricas de los sedimentos costeros permitirán definir la dinámica del transporte y conocer cual de los mecanismos de selectividad (eólica o marina) tiene mayor influencia en la distribución de los tamaños de grano. La petrografía permitirá conocer las relaciones entre las zonas que proveen sedimento y la composición de las arenas, ya que los contenidos de cuarzo, líticos y feldespatos son susceptibles a cambiar durante los ciclos de intemperismo, erosión, transporte y depositación. El análisis de los elementos mayores y elementos traza, serán usados para clasificar geoquímicamente a las arenas de playa, determinar la composición de las rocas de las áreas fuente, las características del intemperismo químico así como la reconstrucción de la dinámica tectónica de la cuenca sedimentaria.

Con base en esta justificación, este estudio contribuirá a la ampliación del conocimiento sobre la procedencia de las arenas de playa del Golfo de México.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general

Determinar la distribución de los tamaños de grano (granulometría), petrografía, y composición geoquímica (elementos mayores y traza) en arenas recientes de las playas de Tamiahua y Tuxpan con la finalidad de obtener información sobre su ambiente de depósito, composición, procedencia y condiciones de intemperismo.

1.3.2 Objetivos Específicos

1) Caracterizar la distribución granulométrica y parámetros texturales de las arenas de playa, para definir la dinámica del transporte y conocer cual de los mecanismos de selectividad (eólica o marina) tiene mayor influencia en su depósito.

- 2) Determinar la composición petrográfica de las arenas de playa para conocer las proporciones de cuarzo, feldespatos y líticos totales, con la finalidad de obtener información sobre su composición mineralógica y clasificación petrográfica.
- 2) Determinar las concentraciones elementos mayores y elementos traza, con el propósito de clasificar geoquímicamente a las arenas de playa, conocer las condiciones de intemperismo, definir su procedencia y finalmente determinar su roca fuente.
- 4) Determinar si existen diferencias granulométricas, petrográficas y geoquímicas entre arenas procedentes de los ríos Tuxpan y Cazones y las arenas de las playas de Tamiahua y Tuxpan para comprobar si estas comparten la misma fuente.

1.6 ANTECEDENTES

A lo largo de las costas mexicanas se han realizado trabajos enfocados en el estudio de los sedimentos de playa. A continuación se mencionan algunos trabajos relacionados tanto con el área de estudio así como con la metodología que se siguió en este trabajo de investigación.

Carranza-Edwards *et al.* (1975) propusieron una clasificación morfo-tectónica de las costas mexicanas, estableciendo nueve unidades continentales y la descripción para cada una de ellas de acuerdo con factores genéticos y geomorfológicos.

Carranza-Edwards *et al.* (1993) realizaron una investigación sobre la procedencia y madurez de las arenas depositadas durante el holoceno en el noroeste de México. Encontraron que la madurez de los sedimentos era escasa debido a la presencia de feldespato y fragmentos rocosos, además de que el ambiente tectónico donde se depositan concordaba con un margen continental activo.

Carranza-Edwards y Rosalez-Hoz (1995) realizaron un estudio sobre las tendencias en el tamaño de grano y la procedencia de las arenas de playa del suroeste del golfo de México, donde basados en la red de drenaje y la fuente del sedimento subdividieron a estas en dos grupos. El primero consiste en arenas procedentes de regiones donde predominan las rocas volcánicas y el segundo en arenas que proceden de rocas

sedimentarias carbonatadas. Además mencionan que la proximidad de las fuentes volcánicas es la responsable del enriquecimiento de fragmentos rocosos que contienen las arenas de playa.

Carranza-Edwards *et al.* (1996), realizaron un análisis detallado para conocer la concentración de carbonatos en las arenas de playa de varias regiones de la república mexicana, para el caso del Golfo de México, desde la frontera entre México y los Estados Unidos, hasta la región de Los Tuxtlas en el estado de Veracruz. Observaron que existe una alta concentración de carbonato de calcio procedente del intemperismo de rocas sedimentarias carbonatadas de la Sierra Madre Oriental, consecuentemente al llegar al océano, el carbonato de calcio contribuye a que se formen arenas gruesas compuestas principalmente de fragmentos de conchas de moluscos entremezcladas con sedimentos terrígenos, disminuyendo gradualmente la concentración hacia el sur debido al aporte de los ríos que conllevan mayor cantidad de sedimentos terrígenos procedentes de rocas volcánicas de los Tuxtlas.

Kasper-Zubillaga *et al.* (1999) analizaron las características petrográficas y geoquímicas de arenas de playa y dunas ubicadas en el oeste del Golfo de México. Encontraron que las arenas presentan una baja concentración de minerales pesados y granos de cuarzo debido a la selectividad del viento. Por el contrario, estos minerales fueron encontrados en ambientes de depósitos fluviales y costeros como consecuencia de la alta energía de transporte. Además, los resultados de los análisis geoquímicos revelaron que los sedimentos proceden de rocas ígneas esto debido a la descarga de los ríos que atraviesan secciones de la Faja Volcánica Trans-Mexicana.

Carranza-Edwards (2001) realizó un estudio a lo largo de 10,000 km del litoral arenoso de México en 294 localidades, subdividiendo en cinco regiones al litoral del Pacífico así como el Golfo de California, además de cuatro regiones en el Caribe y el Golfo de México. Encontró que en general las arenas son bien clasificadas a moderadamente clasificadas y que el tamaño de grano predominante fue de arenas medias a finas. Además de que el promedio del tamaño de grano decrece desde la infraplaya hacia la supraplaya asimismo las arenas de la mesoplaya y supraplaya se encuentran mejor clasificadas que las

arenas de la infraplaya. Esto se debe a la influencia del oleaje y las corrientes litorales. De igual modo, las arenas conformadas por sedimentos terrígenos exhiben tamaños de grano más finos que las arenas donde predominan los carbonatos.

Carranza-Edwards *et al.* (2005) estudiaron la geoquímica en los sedimentos en una zona tectónicamente activa al sureste de México, utilizando elementos mayores, materia orgánica, carbonatos, susceptibilidad magnética, así como parámetros texturales.

Armstrong-Altrin (2009) realizó un estudio geoquímico y petrográfico sobre arenas recientes de tres playas en México (Bahía Kino, Cazones y Acapulco), con el fin de conocer su procedencia, ambientes tectónicos y composición de la roca fuente.

ÁREA DE ESTUDIO

| 2

2.1 CLIMA

El clima varía desde el tropical húmedo (con una temperatura media anual de 25°C y 2150 mm de precipitación pluvial) al subtropical semihúmedo (con una temperatura y precipitación de 22°C y 1000 mm respectivamente). Durante la primavera la sequía es intensa, mientras que en el verano se presentan las lluvias (Martínez *et al.*, 1993). Durante los meses de otoño, fuertes vientos procedentes del norte favorecen el movimiento de la arena a lo largo de la costa en dirección norte-sur. El clima preponderante permite el rápido intemperismo de minerales inestables como el feldespato potásico, con excepción del cuarzo. Por tanto el clima es determinante en la composición mineralógica de los sedimentos.

2.2 FISIOGRAFÍA Y GEOMORFOLOGÍA

El área de estudio se encuentra ubicada en la provincia conocida como Planicie Costera del Golfo de México y dentro de la subprovincia llamada Planicie y lomeríos del norte, que representa un área de 20 125 km². Se extiende desde el límite estatal de Veracruz con el estado de Tamaulipas, hasta Nautla en el sur y abarca una extensión equivalente al 28.2% del territorio del estado (Giessert-Kientz, 1999). El rango altitudinal abarca desde el nivel del mar, en la zona de planicies bajas, hasta los 350 m en la de lomeríos, excepcionalmente puede alcanzar los 1300 m en las sierras aisladas como la de Otontotepec. Esta provincia fisiográfica es recorrida por el curso bajo de los ríos Pánuco, Tuxpan, Cazones, Tecolutla y Nautla que drenan hacia el golfo de México (Jiménez, 1979). Limita al oeste con la Sierra Madre Oriental y al Sur con la Faja Volcánica Trans-Mexicana, los cuales constituyen barreras orográficas relevantes (Islas, 1990a, 1990b).

Existe además una planicie de acumulación eólica-marina, donde predomina la acción del oleaje para modelar formas litorales las cuales son modificadas por el viento

siendo transformadas en dunas. Que corresponde a la flecha litoral de Cabo Rojo que bordea la laguna de Tamiahua. Dicha forma resulta de una acumulación marina predominante a la cual se asocian dunas eólicas al norte de Cabo Rojo así como en la parte interna de la flecha. Esta unidad se encuentra separada de la planicie de Tamiahua por el estero de Milpas al sur, y por el estero Chijol al norte. Este rasgo geomorfológico (cordones litorales y dunas) constituye una importante fuente de sedimentos eólicos para el área de estudio.

2.3 HIDROGRAFÍA

La cuenca del río Tuxpan, ubicada en la porción centro-norte de Veracruz, tiene una superficie de 5 899 km², nace en la Sierra Norte del Estado de Puebla, donde su afluente principal es el río Pantepec. Tiene una longitud aproximada de 150 km, y desemboca en el Golfo de México en el puerto de Tuxpan. Finalmente, en la costa norte del Estado de Veracruz se encuentra la cuenca del río Tamiahua, donde se encuentra también la laguna de Tamiahua (Figura 2). A pesar de encontrarse fuera del área de estudio, es importante mencionar la cuenca del río Pánuco, ya que de acuerdo con Rosales-Hoz *et al.* (2005) es una de las más importantes fuentes de sedimentos terrígenos cercanas al área de estudio. Estas cuencas hidrológicas son importantes para las playas del área de estudio ya que es habitual que los sedimentos costeros en general reflejen la composición de las rocas de fuentes continentales, debido a que frecuentemente derivan de materiales que son intemperizados y transportados desde las tierras altas a través de los sistemas fluviales.

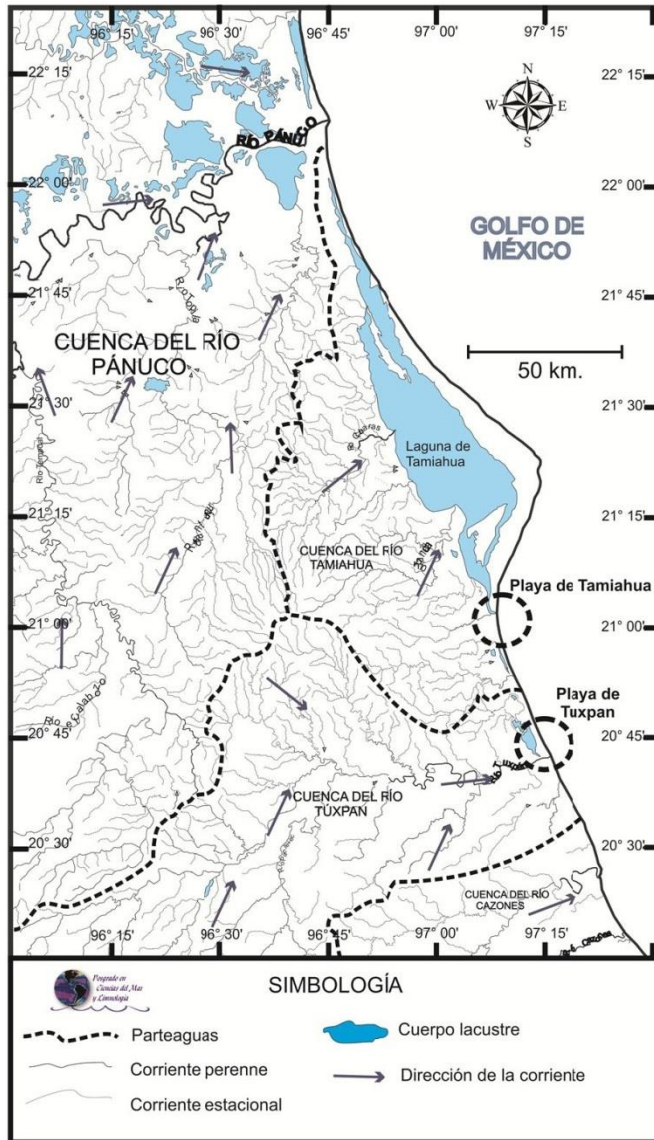


Figura 2. Hidrografía de la porción norte del estado de Veracruz.

2.4 GEOLOGÍA REGIONAL

Las litologías que se encuentran en el área de estudio corresponden a dos grandes provincias geológicas, la primera consiste en rocas sedimentarias de la Sierra Madre Oriental, formadas en ambientes marinos y que se encuentran deformadas debido a la orogenia Laramide; la otra provincia es llamada la Faja de Oro que consiste en depósitos

terciarios de rocas sedimentarias que evidencian una regresión marina, consistente en su mayor parte de arenisca, lutita y algunos conglomerado, además existen pequeños afloramientos de rocas ígneas intrusivas como gabros y rocas ígnea extrusivas básicas tales como tobas y basaltos. A continuación se mencionan las características más generales de las Formaciones geológicas que afloran cerca del área de estudio (Figura 4).

El Triásico está representado por una sola unidad, la Formación Huizachal (TrsLu-Ar), que consiste en una secuencia hasta de 2,000 metros de espesor, de lutitas, lutitas arenosas, areniscas mal clasificadas y conglomerados de color rojo, verde y gris verdoso, siendo su posible origen fosas tectónicas que fueron rellenadas por sedimentos continentales (Carrillo, 1961).

El Jurásico se encuentra representado por una sola unidad, la Formación Pimienta (JsLu-Ar), aflora en la porción sureste de la zona de estudio, consiste en caliza de color negro, gris oscuro, bien estratificada, en bancos delgados (10 a 20 cm.), además, contienen capas abundantes de pedernal (Heim, 1940). Suprayacente se encuentra el cretácico con la Formación Tamaulipas (Ki-Cz), del cretácico inferior consistente en dos miembros; Tamaulipas inferior con calizas criptocristalinas, de color gris en estratos que varían de 30 cm a 1.5 cm de espesor, con nódulos y lentes de pedernal color oscuro de estratificación media, presentándose también líneas estilolíticas en bancos gruesos (Reyes y Carrillo, 1965). El miembro Tamaulipas Superior consiste en caliza criptocristalina de color gris y negro, alternando capas de espesor delgado y medio, que contiene bandas delgadas de pedernal negro, además muestra algunas capas de bentonita de color blanco y amarillo (Carrillo, 1969)

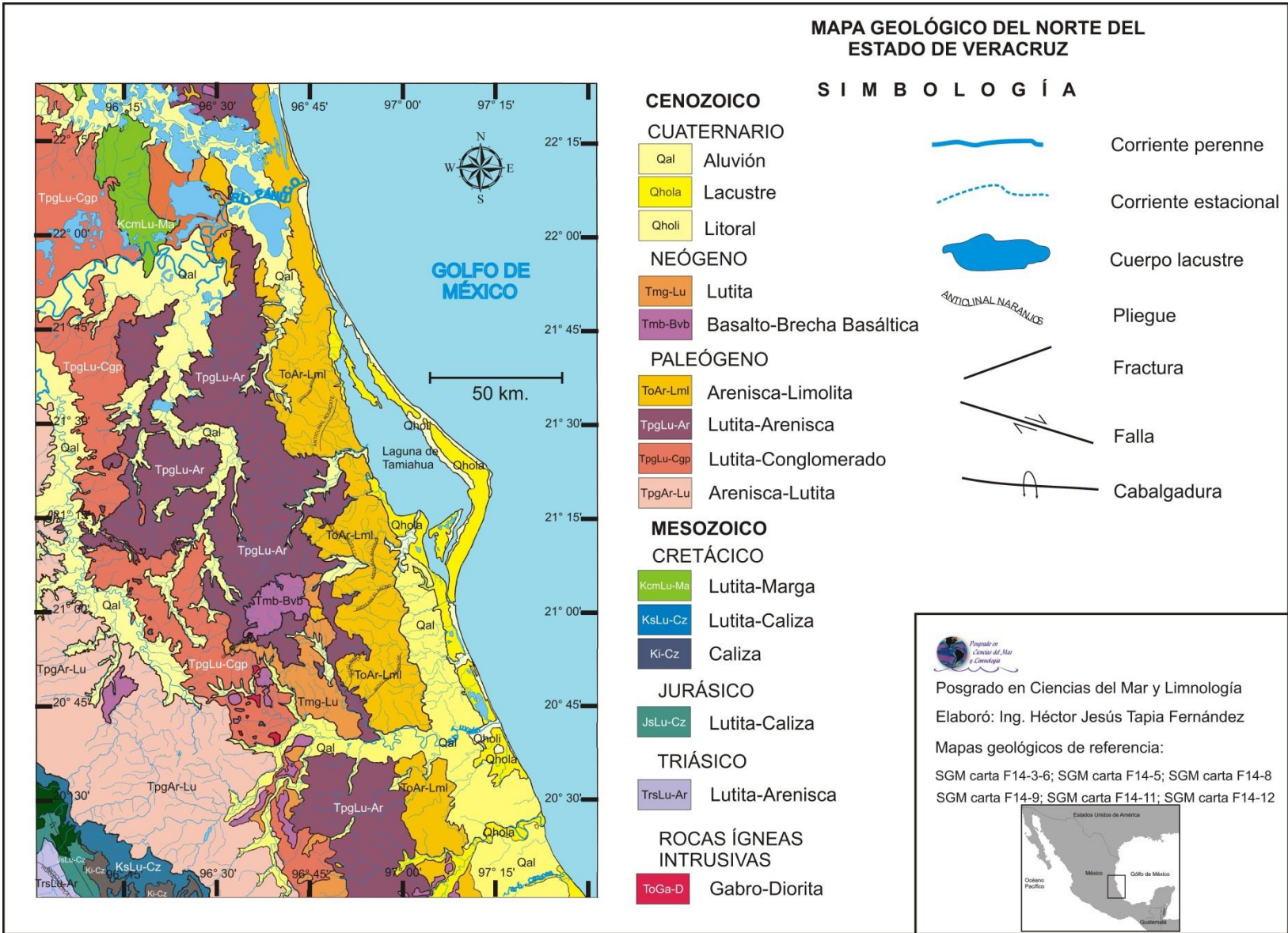
Suprayacente a la formación Tamaulipas se encuentra la Formación San Felipe (KsLu-Cz), de un espesor aproximado de 200 m que consiste en caliza criptocristalina y caliza arcillosa, con presencia de bentonita, que varía su color de gris verdoso a tonalidades más oscuras hacia su base, alternando con capas delgadas de lutitas del mismo color con presencia de bentonita verde y blanca. Finalmente concordante y suprayacente encontramos a la Formación Méndez (KmcLu-Ma), que consiste en margas

grises que varían de espesor de 1 o más metros (Dumble, 1918). Ocasionalmente pueden presentarse capas de arenisca en especial en el contacto con la Formación Chicontepec del Paleógeno.

El cenozoico se encuentra suprayacente a la Formación Méndez del cretácico superior, encontramos en primera instancia a la Formación Chicontepec (Tpg-Ar-Lu), que está compuesta por areniscas de color marrón, de capas alrededor de 50 cm de espesor, con presencia de bioturbación (galerías de anélidos), que en algunas partes puede contener material bituminoso (Belt, 1925; Palmer, 1927). Interstratificadas a las areniscas se encuentran lutitas de color gris a café amarillento con un espesor de aproximadamente 20 cm. En conformidad a la Formación Chicontepec, se encuentra la Formación Tantoyuca (TgpLu-Cgp), que consiste en areniscas de grano fino a grueso y areniscas conglomeráticas de matriz calcárea con algunas intercalaciones de lutita o de marga arenosa de colores gris a gris oscuro. También tiene desarrollos de conglomerados y brechas constituidas principalmente por fragmentos de calizas del cretácico y por pedernal, presenta algunos fragmentos de areniscas provenientes de la Formación Chicontepec (López-Ramos, 1978). Seguidamente, se encuentra la Formación Palma Real (TpgLu-Ar), dividida por Barker y Blow (1976), en dos miembros: El Palma Real inferior está conformado por facies costera de aguas someras, consistente en areniscas, conglomerados y margas arenosas, mostrando los estratos variaciones laterales muy marcadas. Los conglomerados tienen cantos de calizas del cretácico y guijarros de pedernal; también se encuentran lentes de caliza coralina. Las facies de arenisca frecuentemente están bien estratificadas y en ocasiones se advierten en ellas huellas del oleaje. El miembro Palma Real superior está conformado por lutitas finas de color gris, ligeramente arenosas en parte, con algunas intercalaciones de arenisca de grano fino del mismo color. Finalmente para este sistema, se encuentra la Formación Mesón (TpgLu-Lm), consistente en lutitas y margas muy arenosas de color gris, intercaladas con limolitas calcáreas de de 20 a 30 cm de espesor. Concordante a la formación Mesón, se encuentra la Formación Escolin que aflora cerca de las costas del Golfo de México, consiste en margas de color gris oscuro, masivas y que se encuentran cubiertas por margas arenosas

que alternan con capas de arenisca calcárea de grano fino a medio y caliza arenosa. Esta formación presenta sedimentos característicos de un periodo de regresión (Barker y Blow, 1976). Suprayacente a la formación antes descrita, se encuentra la formación Tuxpan, que consiste en capas de arenisca, de arenisca calcárea y caliza arenosa, donde localmente se aprecian algunos conglomerados, particularmente hacia la base de la formación. Los sedimentos de ésta formación fueron depositados durante una transgresión de aguas someras, seguida por una regresión, hasta alcanzar su posición actual en el Golfo de México. Finalmente durante el Pleistoceno y Holoceno se encuentran depósitos no consolidados de areniscas eólicas y de litoral, con algunas zonas con grandes extensiones de aluviones y depósitos lacustres.

Figura 3. Mapa geológico del área de estudio.



MATERIALES Y MÉTODOS

| 3

A continuación se describe la metodología que se siguió para alcanzar los objetivos planteados en la presente investigación.

3.1 TRABAJO DE CAMPO

Se desarrollaron campañas de trabajo de campo entre marzo de 2011 y marzo de 2012, recorriendo las costas del estado de Veracruz desde Tamiahua hasta la región de los Tuxtlas; para el caso de este estudio se colectaron 4 muestras de sedimentos en el río Cazones y 3 en el río Tuxpan; asimismo en las playas de Tuxpan y Tamiahua se colectaron 15 y 10 muestras de arena de playa respectivamente para realizar los análisis granulométricos y geoquímicos (elementos mayores, traza y tierras raras) correspondientes.

3.2 GRANULOMETRÍA

La preparación y tamizado de las muestras fue realizada tanto en el Laboratorio de Geoquímica como en el Laboratorio de Sedimentología, ambos ubicados en el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología y consistió de varias etapas.

En primera instancia se lavaron las muestras con agua destilada para quitar la sal, que es indeseable ya que tiende a conglomerar a los granos de arena y puede afectar los resultados del tamizado. Posteriormente se utilizaron cuarteadores con el fin de agilizar el proceso y tener una fracción representativa de cada una de las muestras (Figura 4). En una balanza electrónica se pesaron 40 g. de muestra cuarteada para el tamizado y posteriormente se llevó a cabo este procedimiento en el equipo Ro-Tap sieve Shaker (Figura 5) del Laboratorio de Sedimentología del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. El tamizado se realizó con un intervalo granulométrico de 0.5 phi (ϕ) en la

malla, durante un periodo de 20 minutos. Finalmente, los materiales tamizados de cada muestra fueron pesados por separado y guardados en bolsas debidamente etiquetadas.



Figura 4. Equipo Ro-Tap sieve Sha-ker.



Figura 5. Cuarteadores del Laboratorio de Sedimentología.

3.2.1 Parámetros texturales

Para determinar los parámetros texturales se usaron las fórmulas y límites propuestos por Folk (1974).

3.2.1.1 Tamaño Gráfico Promedio ($Mz\phi$)

Expresa el diámetro de las partículas de una muestra. Este es un parámetro estadístico que representa el tamaño de grano medio de la distribución total de los sedimentos. Las diferencias en la distribución de tamaños de partícula se relaciona con las características de la roca del área fuente y a la distancia entre la fuente del sedimento con respecto al área de depósito. También los diferentes mecanismos de selectividad (eólicos y marinos) que existen en el área de depósito influyen en las características granulométricas del sedimento, por lo que este parámetro sirve para conocer la naturaleza de los sedimentos y sus condiciones de depósito.

El tamaño gráfico promedio se calcula con la siguiente ecuación:

$$Mz\phi = \frac{\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84}}{3}$$

Donde sus límites son:

-1 ϕ a 0.01 ϕ	Arena muy gruesa
0.01 ϕ a 1.0 ϕ	Arena gruesa
1.1 ϕ a 2.0 ϕ	Arena mediana
2.01 ϕ a 3.0 ϕ	Arena fina
3.01 ϕ a 4.0 ϕ	Arena muy fina

3.2.1.2 Desviación estándar gráfica inclusiva ($\sigma_I\phi$)

La desviación estándar gráfica inclusiva proporciona el grado de clasificación de la muestra, es decir, indica el grado de homogeneidad de los granos de sedimento. La clasificación de los sedimentos está influenciada por el grado de turbulencia, velocidad de transporte, naturaleza de los sedimentos y/o por el transporte eólico (Kasper-Zubillaga y Carranza-Edwards, 2005).

La ecuación utilizada para su determinación es la siguiente:

$$\sigma_I\phi = \frac{\phi_{84} - \phi_{16}}{4} + \frac{\phi_{95} - \phi_5}{6.6}$$

Donde sus límites son:

< 0.35 ϕ	Muy bien clasificado
0.35 ϕ a 0.50 ϕ	Bien clasificado
0.50 ϕ a 0.71 ϕ	Moderadamente bien clasificado
0.71 ϕ a 1.00 ϕ	Moderadamente clasificado
1.00 ϕ a 2.00 ϕ	Mal clasificado
2.00 ϕ a 4.00 ϕ	Muy mal clasificado
> 4.00 ϕ	Extremadamente mal clasificado

3.2.1.3 Grado de asimetría (Sk_I)

El grado de asimetría es una medida de dispersión de los sedimentos y nos indica que las curvas con asimetría positiva representan aquellas muestras con un exceso de material fino, mientras que las que presentan asimetría negativa contienen un exceso de material grueso. Esta medida es importante ya que puede funcionar como un indicador de mezcla de arenas finas y arenas de grano grueso (Folk, 1957, 1974).

La ecuación utilizada para su determinación es la siguiente:

$$Sk_I = \frac{(\phi_{16} + \phi_{84} - 2\phi_{50})}{2(\phi_{84} - \phi_{16})} + \frac{(\phi_5 + \phi_{95} - 2\phi_{50})}{2(\phi_{95} - \phi_5)}$$

Donde sus límites son:

1.0 ϕ a 0.3 ϕ	Muy asimétrico hacia los tamaños finos
0.3 ϕ a 0.1 ϕ	Asimétrico hacia los tamaños finos
0.1 ϕ a - 0.1 ϕ	Casi simétrico
- 0.1 ϕ a - 0.3 ϕ	Asimétrico hacia los tamaños gruesos
- 0.3 ϕ a - 1.0 ϕ	Muy asimétrico hacia los tamaños gruesos

3.2.1.4 Curtosis (K_G)

La curtosis es una medida de angulosidad de la curva de frecuencia, como relación de proximidad entre los valores centrales, generalmente el 50% central y los valores externos, en el 90%. En general si la curva de frecuencia unimodal, presenta un pico muy agudo es leptocurtica, si presenta una zona horizontal en el máximo es platicurtica y si es similar a la normal es mesocurtica. Esta medida refleja en cierto modo, el número de tamaños de grano que hay en la muestra y su distribución.

La curtosis se determina usando la siguiente ecuación:

$$K_G = \frac{\phi_{95} - \phi_5}{2.44(\phi_{75} - \phi_{25})}$$

Donde sus límites son:

<0.67 ϕ	Muy platicúrtico
0.67 ϕ a 0.90 ϕ	Platicúrtico
0.90 ϕ a 1.11 ϕ	Mesocúrtico
1.11 ϕ a 1.50 ϕ	Leptocúrtico
1.50 ϕ a 3.00 ϕ	Asimétrico hacia los gruesos
>3.00 ϕ	Extremadamente leptocúrtico

3.3 ANÁLISIS PETROGRÁFICO

Para la determinación de la composición mineralógica de las arenas de playa, se utilizó el método cuantitativo mediante el conteo de puntos (Figura 6). El cual consiste en el conteo de granos de arena en microscopio petrográfico, mediante una platina graduada que permite el movimiento de la lámina delgada a determinado intervalo de distancia, para formar una red de puntos en un sistema de coordenadas (Sánchez-Zavala y Centeno-García, 2000). Esta técnica permite registrar en cada punto la composición del grano localizado en el centro de la retícula.

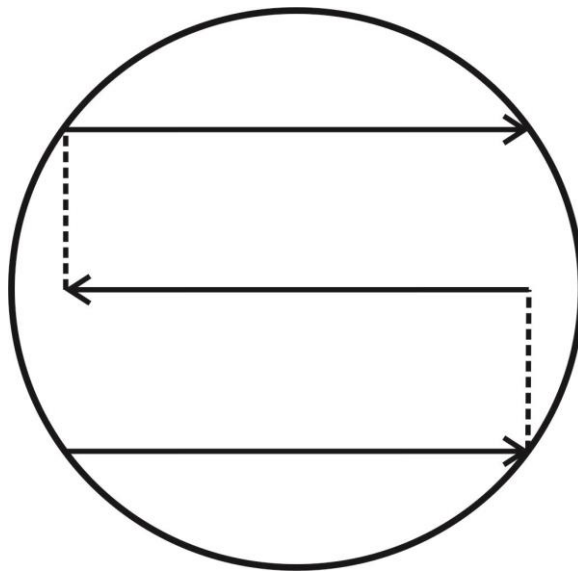


Figura 6. Método de conteo por puntos.

Por cada lámina se realizó un conteo de 300 puntos y se utilizaron los siguientes campos: Cuarzo total (Ct), Feldespato Potásico (Fk), Plagioclasas (Plag.) Líticos volcánicos (Lv),

Líticos metamórficos (Lm), Líticos sedimentarios (Ls), Líticos plutónicos; MP, minerales pesados, Biogénicos (Biog.)

3.4 GEOQUÍMICA

En total se analizaron 32 muestras (15 muestras de Tamiahua, 10 de Tuxpan, 3 del Río Tuxpan y 4 del Río Cazones) para elementos mayores y elementos traza incluidos los elementos de Tierras Raras.

En laboratorio se cuartearon las muestras para obtener una fracción representativa de las mismas. Una parte de la muestra se utilizó para la realización de láminas delgadas con la finalidad de realizar las descripciones petrográficas correspondientes. Posteriormente se preparó una solución ácida de HCl de concentración de 0.004%, con la finalidad de retirar los materiales calcáreos de la muestra. Después de 24 horas de exposición se lavó la muestra con agua destilada para retirar el material disuelto y finalmente pasar al proceso de secado. Posteriormente, se trituraron las muestras en un pulverizador marca Fritsch Pulverisette 2 (Figura 7) con mortero de ágata del Laboratorio de Físico-Química Marina del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. En la pulverización de las muestras se debe tener especial cuidado para evitar la contaminación con otras muestras o con materiales utilizados en el proceso; para ello es importante limpiar cuidadosamente el área de trabajo y los instrumentos antes y después de la pulverización de cada muestra; con este propósito se utiliza una pequeña fracción de la muestra por procesar donde el polvo obtenido de esta molienda es desechado evitando así que los residuos de arena pulverizados anteriormente y que no fueron eliminados contaminen la muestra. Posteriormente, la muestra se introduce en el mortero de ágata durante un periodo de 10 minutos hasta obtener un polvo con apariencia de talco (con la intención de obtener un tamaño de partícula menor a 74μ). Finalmente el polvo obtenido de cada muestra fue pesado hasta obtener 10 gramos, donde 5 gr se utilizaron para los análisis de elementos mayores y el resto para la determinación de concentraciones de elementos traza y Tierras Raras.



Figura 7. Pulverizador Fritsch modelo Pulverisette 2 de mortero de ágata del Laboratorio de Físico-Química Marina del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología.

3.4.1 Métodos Analíticos

3.4.1.1 Fluorescencia de Rayos X (XRF) para el análisis de elementos mayores

El método de Fluorescencia de Rayos X conocido como XRF es uno de los métodos más usados para determinar elementos mayores. Este método según Rollinson (1993), está basado en la excitación de la muestra mediante rayos X, para lo cual se dispara un haz de rayos X primario que produce la excitación y formación de rayos X secundarios (fluorescencia) el cual tiene las características específicas de longitud de onda para cada uno de los elementos presentes en la muestra, la intensidad de estos rayos X secundarios se utiliza para determinar la concentración de los elementos presentes de acuerdo con estándares de calibración y aplicando las correcciones necesarias que se requieren para eliminar los errores analíticos.

Posteriormente las muestras fueron analizadas en el LUGIS del Instituto de Geología, UNAM donde a continuación se describe brevemente el procedimiento efectuado:

La determinación de elementos mayores se realiza mediante una “perla”; esta es preparada con 1 g de muestra en polvo con 9 g de fundente compuesto en una proporción 50:50 de porcentaje en peso de $Li_2B_4O_7 - Li_2BO_2$. La mezcla es vaciada en un crisol y es calentada a una temperatura próxima a 1,100 ° Celsius en un horno equipado con quemadores Fisher y moldes para la preparación simultánea de 3 perlas. Previo al calentado, se adicionan 2 gotas de $LiBr$ en solución acuosa en una concentración de 250 g/l, esto evita que la perla se adhiera al molde. Una vez enfriadas las perlas, se retiran del molde con cuidado, evitando el contacto con las manos para evitar contaminarlas, al reverso de la perla se le coloca una etiqueta con el nombre de la muestra y la fecha de elaboración.

Como complemento del análisis de elementos mayores, se requiere determinar la pérdida por calcinación (PXC), lo cual se hace al calentar a 1,000° Celsius un gramo de muestra en base seca, colocándola en un crisol de porcelana por un periodo de 60 minutos. Finalmente, se deja enfriar a temperatura ambiente.

Para el cálculo de la pérdida por calcinación se utiliza la fórmula:

$$\%PxC = (\text{peso seco} - \text{peso calcinado}) \times 100$$

Para los análisis se utilizó un espectrómetro secuencial de rayos X Siemens SRS-3000, equipado con un tubo de rodio y ventana de berilio, el cual mide concentraciones de elementos mayores (Si, Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K y P). Los errores estimados en las determinaciones son <1% en elementos mayores (Lozano-Santa Cruz *et al.*, 1995; Verma *et al.*, 1996).

Previo a los análisis se calibra el equipo de acuerdo con los estándares preestablecidos para cada material que se desee analizar. Las curvas de calibración son construidas con estándares emitidos por instituciones de reconocido prestigio internacional.

3.4.1.2 Espectrometría de masas con fuente de plasma acoplado inducido (ICP-MS) para el análisis de elementos traza y Tierras Raras

El método de espectrometría de masas con fuente de plasma acoplado inducido, es una técnica que permite límites de detección muy bajos así como buena precisión, lo que hace que este método sea muy usual. En este procedimiento, los átomos son extraídos del plasma a través de un orificio a un sistema de vacío y bombeados con un lente iónica a un espectrómetro de masas (Rollinson, 1993).

Las concentraciones de elementos traza de 32 muestras, incluidas los elementos de Tierras Raras (REE), se obtuvieron por el método ICP-MS en el Laboratorio de Geoquímica del Instituto de Geología, de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Para la medición de las concentraciones, se utilizó un instrumento de marca Thermo Series XII (Figura 8). A continuación se describe brevemente el procedimiento efectuado.



Figura 8. Equipo ICP-MS del Laboratorio de Geoquímica del Instituto de Geología de la UASLP.

Una vez molidas las muestras se seleccionan 0.22 gr de cada una de ellas para realizar la digestión. En vasos de teflón se realizan una serie de digestiones con ácido fluorhídrico (HF) y ácido perclórico ($HClO_4$) y se calienta la solución en una parrilla a una

temperatura aproximada de 60° C hasta que finalmente se obtiene una pasta. Posteriormente se agrega una solución a base de Indio (se utiliza este elemento ya que no se encuentra naturalmente en las muestras y evita las interferencias en las lecturas del aparato) con una concentración de 10 ppb y se afora en matraces de 100 ml. Posteriormente se filtra la solución con filtros del número 41, para retirar turbiedades indeseables. Finalmente la muestra se guarda en envases de plástico a la espera de realizar el análisis de ICP-MS.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

| 4

4.1 GRANULOMETRÍA

4.1.1 Parámetros texturales

Los parámetros de tamaño de grano para las dos playas de estudio (Tamiahua y Tuxpan), fueron calculados con base en el método gráfico de Folk y Ward (1957); así el tamaño medio de las arenas de Tamiahua va de 2.6 a 2.8 ϕ lo cual según los límites propuestos por Folk y Ward (1957) son predominantemente arenas finas. Por otro lado el tamaño medio de las arenas de Tuxpan va de 2.7 a 2.8 ϕ y también son arenas finas (Tabla 1). Kasper-Zubillaga (2009) sugiere que el transporte eólico y la selectividad del viento produce arena de grano fino bien clasificada, mientras que la mezcla de procesos eólicos/marinos generan diferentes tamaños de grano. Los tamaños de grano para los Ríos Tuxpan y Cazones van de gravas finas (1.6 ϕ) a arenas medias (0.8 ϕ).

Tabla 1. *Tamaño gráfico promedio (Mz ϕ) para las arenas de playa de Tamiahua, Tuxpan, Ríos Tuxpan y Cazones.*

Playa	Tamaño gráfico promedio (Mz ϕ)	Clasificación
Tamiahua	2.6 a 2.8 ϕ	Arenas finas
Tuxpan	2.7 a 2.8 ϕ	Arenas finas
Río Tuxpan	- 1.6 a 1.6 ϕ	Grava fina, arena muy gruesa
Río Cazones	0.8 a 1.5 ϕ	Arena grueso, arena media

Los valores de la desviación estándar para las arenas de Tamiahua fueron de ~0.2 a 0.3 ϕ en la mayoría de las muestras, lo que indica arenas muy bien clasificadas, sólo la muestra THA1 presenta una desviación de 0.4 siendo la única donde las arenas son bien

clasificadas. Para las arenas de Tuxpan, los valores de desviación estándar van de ~ 0.2 a 0.3ϕ , y son también arenas muy bien clasificadas (Tabla 2). Los valores de desviación estándar para las arenas del Río Tuxpan van de 0.6 a 1.5ϕ que indican que son moderadamente bien clasificadas a mal clasificadas. De forma similar a los valores para las arenas del Río Cazonas van de 0.9 a 1.5ϕ , que indican que son moderadamente clasificadas así como mal clasificadas.

Tabla 2. Desviación estándar gráfica inclusiva ($\sigma_I \phi$) par las arenas de Tamiahua, Tuxpan, Ríos Tuxpan y Cazonas.

Playa	Desviación estándar ($\sigma_I \phi$)	Clasificación
Tamiahua	0.2 a 0.4ϕ	Muy bien clasificado y bien clasificado
Tuxpan	0.2 a 0.3ϕ	Muy bien clasificado
Río Tuxpan	0.6 a 1.5ϕ	Moderadamente bien clasificado y mal clasificado
Río Cazonas	0.9 a 1.5ϕ	Moderadamente clasificado y mal clasificado

Carranza Edwards *et al.* (2009) sugieren que las arenas bien clasificadas se forman cuando éstas se exponen a la abrasión del oleaje que produce la reducción del tamaño de grano y mejora su clasificación. Kasper-Zubillaga y Carranza Edwards (2005) apuntan que debido a la selectividad marina, fluvial y eólica se pueden producir arenas finas bien clasificadas en ambientes sedimentarios de playa y dunas.

Asimismo Carranza-Edwards (2001) alude que las arenas de la supraplaya y mesoplaya tienden a presentar arenas bien clasificadas, ya que hacia la infraplaya las corrientes litorales y la energía de las olas rompientes causan turbulencia e incrementa la mezcla existiendo mayor cantidad de arenas gruesas y por tanto una mala clasificación. Las arenas de Tamiahua y Tuxpan fueron colectadas en la zona de mesoplaya y están muy bien clasificadas. Esta homogeneidad puede explicarse por los procesos que ocurren en mesoplaya como las corrientes laminares y el vaivén de las olas que suceden en el frente de playa, donde además existe influencia del viento. Además el clasificado de los

sedimentos puede depender de su distancia de transporte, si es larga ocasiona un buen clasificado mientras que si ésta es corta causa un mal clasificado.

Los valores observados en el grado de asimetría (Tabla 3) para las arenas de Tamiahua mayoritariamente se encuentra entre - 0.1 a 0.1 ϕ lo que sugiere una homogeneidad en los tamaños de grano, aunque predominan los valores positivos, lo cual sugiere que las arenas de Tamiahua tienden a presentar granos de tamaño fino. La muestra THA1 muestra una asimetría muy marcada hacia los gruesos mientras que solo la muestra THA14 muestra una simetría hacia los finos. En las arenas de Tuxpan predominan solo los valores negativos que van de - 0.3 a - 0.05 ϕ indicando la presencia de arenas gruesas en el sedimento. Los valores para las arenas de los ríos Tuxpan y Cazones son predominantemente negativos - 0.4 a - 0.2 ϕ , lo cual indica que muestran una asimetría muy marcada hacia los tamaños muy gruesos y gruesos.

Tabla 3. Grado de asimetría (Sk_1) para las arenas de Tamiahua, Tuxpan, Río Tuxpan y Río Cazones.

Playa	Grado de asimetría (Sk_1)	Clasificación
Tamiahua	- 0.1 a 0.1 ϕ	Casi simétrico y asimétrico hacia los finos
Tuxpan	- 0.3 a - 0.05 ϕ	Casi simétrico y asimétrico hacia los gruesos
Río Tuxpan	- 0.4 a 0.9 ϕ	Muy asimétrico hacia los gruesos y muy asimétrico hacia los finos
Río Cazones	- 0.4 a - 0.2 ϕ	Muy asimétrico hacia los gruesos y asimétrico hacia lo gruesos

Esto puede corresponder a que la playa de Tuxpan se encuentra cerca de la desembocadura del río Tuxpan, y dado que las corrientes litorales tienen una dirección preferencial N-S durante la mayor parte del año (Zavala-Hidalgo et al., 2003; Rojas-Álvarez, 2008) acarrear arena gruesa hacia la playa, pudiéndose observar gran acumulación de arena en la escollera norte del puerto de Tuxpan. Mientras que en Tamiahua no existen desembocaduras de río importantes, la más próxima (Río Tuxpan) se

encuentra a 30 km al SE y por tanto predomina el transporte litoral y eólico lo que resulta en arenas de tamaño fino y muy bien clasificadas.

Los valores de curtosis para las arenas de Tamiahua van de 1.0 a 1.4 ϕ que representa una curtosis que va de mesocúrtica a leptocúrtica, predominando la primera. Para las arenas de Tuxpan los valores fueron de 1.0 a 1.3 ϕ y predominan las clases leptocúrticas, donde solo la muestra TX11 muestra una clase platicúrtica. Los valores para las arenas del Río Tuxpan van de 1.4 a 6.3 ϕ , de leptocúrtica a extremadamente leptocúrtica, mientras que para las arenas del Río Cazones los valores van de 0.9 a 1.4 ϕ que indica curtosis mesocúrtica y leptocúrtica.

Tabla 4. Curtosis (K_G) para las arenas de Tamiahua, Tuxpan, Ríos Tuxpan y Cazones.

Playa	Curtosis (K_G)	Clasificación
Tamiahua	1.0 a 1.4 ϕ	Mesocúrtica-Leptocúrtica
Tuxpan	1.0 a 1.3 ϕ	Leptocúrtica
Río Tuxpan	1.4 a 6.3 ϕ	Extremadamente leptocúrtica y Leptocúrtica
Río Cazones	0.9 a 1.4 ϕ	Mesocúrtica y Leptocúrtica.

4.2. AMBIENTE SEDIMENTARIO

Los diagramas binarios permiten interpretar el ambiente sedimentario de las arenas ya que permiten discriminar entre los ambientes de playa, río y duna (Friedman, 1961; Moiola y Weiser, 1968; Passega, 1964).

El diagrama $\sigma_I\phi$ contra Sk_I (Figura 9a) propuesto por Friedman (1967) y el diagrama Sk_I contra $\sigma_I\phi$ (Figura 9b) planteado por Friedman (1967) así como Moiola y Weiser (1968), se utilizan para discriminar entre los ambientes sedimentarios de río y playa.

Al aplicar los diagramas a las muestras de arena de Tamiahua y Tuxpan estas caen dentro del ambiente de playa, mientras que las muestras de arena de los Ríos Tuxpan y

Cazones dentro del ambiente de río. El ambiente sedimentario concuerda con la muy buena clasificación de las arenas y los tamaños predominantes (arenas finas), ya que los sedimentos de río se encuentran compuestos de tamaños de partícula heterogéneos, como gravas, arenas y lodos en distintas proporciones, que asimismo son generalmente mal clasificados.

El diagrama $Mz\phi$ contra $\sigma_1\phi$ (Figura 9c) propuesto por Friedman (1961) y el diagrama $Mz\phi$ contra Sk_1 (Figura 9d) propuesto por Moiola y Weiser (1968), así como Hails y Hoyt (1969) es utilizado para discriminar entre los ambientes sedimentarios litorales de playa y duna.

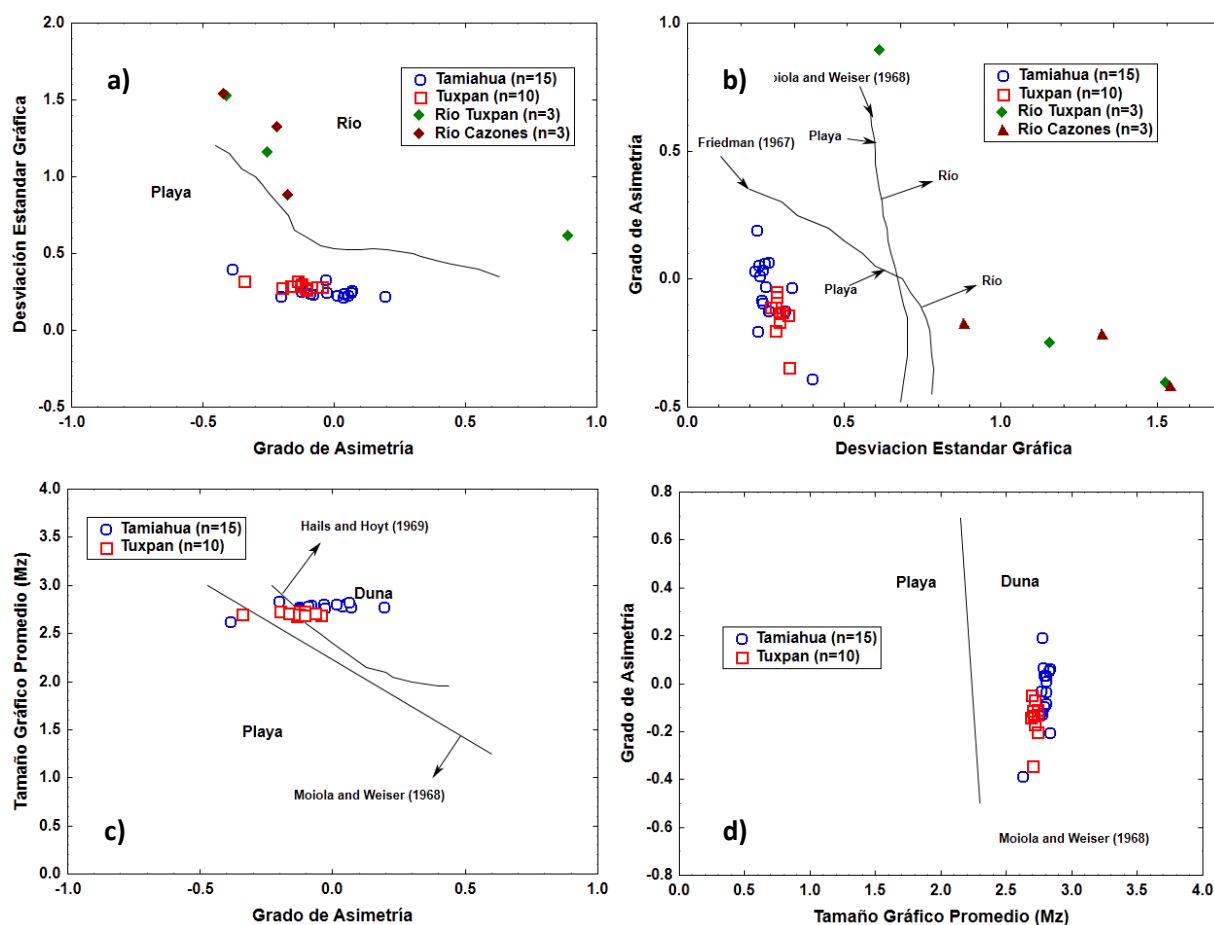


Figura 9. a) Diagrama $Mz\phi$ contra $\sigma_1\phi$ (Friedman, 1961); b) Diagrama Sk_1 contra $\sigma_1\phi$ (Friedman, 1967; Moiola y Weiser, 1968); c) Diagrama $Mz\phi$ contra σ_1 (Friedman, 1961); d) Diagrama $Mz\phi$ contra Sk_1 (Moiola y Weiser, 1968; Hails y Hoyt, 1969).

En el primero la totalidad de las arenas de las dos playas caen dentro del ambiente de duna, mientras que en el segundo la mayoría de las muestras de Tamiahua caen dentro del ambiente de Duna. Las muestras de Tuxpan caen en los dos ambientes. Esto refleja que en las playas de Tuxpan existe una interacción importante entre los procesos del oleaje en la playa y la acción eólica que transporta granos finos hacia la misma. Mientras que en Tamiahua existe una predominancia de la acción eólica en la sedimentación y esto concuerda con los tamaños más finos encontrados en esta zona.

4.4 PETROGRAFÍA

El análisis petrográfico mostró que el cuarzo es sumamente abundante en las arenas de Tamiahua (71 – 75 %) y Tuxpan (67 – 68 %), mientras que su contenido disminuye drásticamente para las arenas de los ríos Tuxpan y Cazones (17 – 30 %), como se muestra en la tabla 8. El promedio de cuarzo-feldespatos-líticos que se obtuvo fue de $Qt_{73} - Ft_{20} - Lt_6$, $Qt_{68} - Ft_{16} - Lt_{14}$, $Qt_{21} - Ft_2 - Lt_{66}$ y $Qt_{25} - Ft_2 - Lt_{63}$ para las arenas de Tuxpan, Tamiahua, río Tuxpan y río Cazones respectivamente.

Las plagioclasas son abundantes en las arenas de Tamiahua (14 – 20 %) y Tuxpan (11 %). Para los fragmentos líticos, en las arenas de Tamiahua predominan los líticos sedimentarios (4 – 6 %), al igual que en las arenas de Tuxpan (7-10%), sin embargo en las arenas del río Tuxpan los líticos sedimentarios alcanzan hasta un 61%, mientras que en las arenas del río Cazones predominan los líticos volcánicos (44-54%). Los fragmentos líticos metamórficos y plutónicos son escasos tanto para las arenas de Tamiahua y Tuxpan como para las de los ríos Tuxpan y Cazones.

Tabla 5. Petrografía de las arenas de Tamiahua, Tuxpan, río Tuxpan y Cazones.

Localidad	Tamiahua						Tuxpan		R.T.	Río Cazones			
Muestra #	THA2	THA5	THA7	THA9	THA11	THA13	THA15	TX9	TX11	RTX1	RCAZ1	RCAZ2	RCAZ4
Ct	71	73	73	70	75	74	73	67	68	21	17	30	28
Fk	3	3	2	2	3	3	3	6	4	1	0	1	0
P	19	14	20	19	15	15	16	11	11	1	1	2	2
Lv	1	1	1	1	1	1	1	4	3	5	54	44	49
Lp	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	8	3	5
Ls	5	5	4	5	6	5	5	7	10	61	8	6	8
Lm	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	2	1	0
Mp	1	3	1	2	0	1	1	4	3	11	10	14	8
Biog.	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Ct= cuarzo; Fk= feldespato potásico; P= plagioclasa; Lv= líticos volcánicos; Lp= líticos plutónicos; Ls= líticos sedimentarios; Lm= líticos metamórficos; Mp= minerales pesados; Biog.= componentes biogénicos.

Además se observó que los minerales pesados son más abundantes en las arenas del río Cazones (8 – 14 %) y río Tuxpan (11 %), y son escasos para las arenas de Tuxpan y Tamiahua (1 – 4 %).

El diagrama ternario Ct-Ft-Lt (Figura 10; Folk, 1989) muestra que las arenas de Tamiahua y Tuxpan son subarcosas, mientras que las arenas de los ríos Tuxpan y Cazones son litoarenitas.

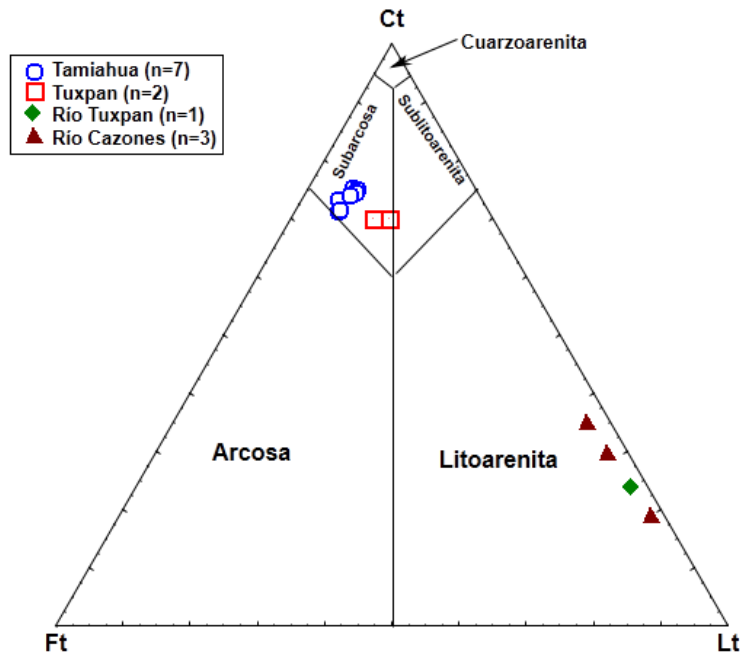


Figura 10. Diagrama ternario Ct-Ft-Lt (Folk, 1980)

4.4.1 Condiciones para el enriquecimiento en cuarzo

El transporte litoral de sedimentos es el proceso mediante el cual el material es removido mediante el tren de oleaje que produce corrientes litorales (Marín-Guzmán y Carranza-Edwards, 2011). El viento es el responsable de producir corrientes dominantes a lo largo de la costa, las cuales presentan una dirección igual a la de la componente del vector viento a lo largo de la costa. Tomando en cuenta que los vientos cambian de dirección, estas corrientes pueden presentar variaciones a lo largo del año (Zavala-Hidalgo y Fernández, 2004).

Varios estudios (Armstrong-Altrin, *et al.*, 2009; Carranza-Edwards *et al.*, 2009) muestran que existe una relación entre las arenas siliciclásticas con su tipo de roca fuente y el ambiente tectónico donde se depositan. Se ha observado que las arenas ricas en cuarzo pueden derivarse del intemperismo de rocas sedimentarias, las cuales son ricas en cuarzo, mientras que las arenas ricas en feldspatos y cuarzo pueden derivarse de rocas ígneas (granitos).

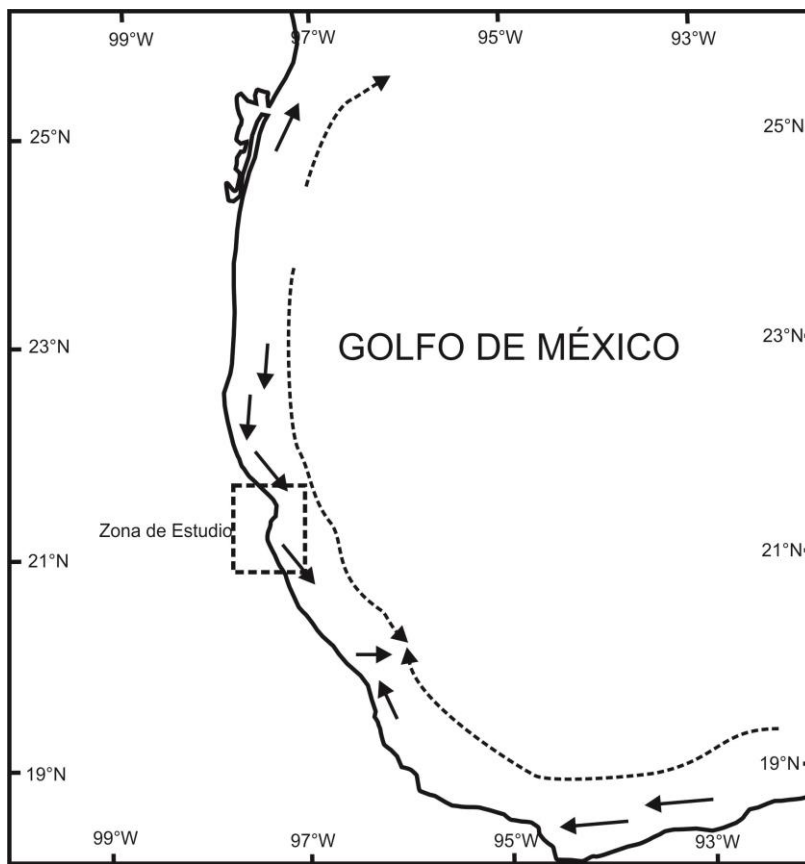


Figura 11. Transporte litoral dominante en el Golfo de México (Modificado de Marín-Guzmán y Carranza-Edwards, 2011).

Por otra parte, las diferencias en los tamaños de grano de las arenas de playa han contribuido a conocer el ambiente tectónico de una región en particular y se ha observado que a lo largo de márgenes continentales pasivos (en el caso del Golfo de México), las rocas sedimentarias son abundantes y proveen de cuarzo; además de que el clima preponderante permite el rápido intemperismo de minerales inestables como el feldespato potásico. Por tanto, las arenas de Tuxpan y Tamiahua son sumamente ricas en cuarzo debido a la alta durabilidad de este mineral (Armstrong-Altrin *et al.*, 2004). Otros orígenes propuestos para las arenas ricas en cuarzo son: 1) la abrasión eólica, que es responsable no solo de la pérdida de feldespatos y fragmentos líticos, si no también del excelente redondeo de los granos de cuarzo (Kuenen, 1960; Dott, 2003); 2) la abrasión prolongada del oleaje en la playa (Krynine, 1940; Folk, 1960, 1980); 3) la prolongada abrasión en un sistema de corrientes provocadas por mareas (Swett *et al.*, 1971); 4) un

intenso intemperismo químico provocado en ambientes húmedos/tropicales (Folk,1980; Suttner *et al.*, 1981; Chandler, 1988; Ferree *et al.*, 1988; Johnsson *et al.*, 1988; Johnsson, 1991); 5) un reciclamiento de antiguas cuarzoarenitas (Krynine, 1941; Pettijohn, 1963; Suttner *et al.*, 1981; Ferre *et al.*, 1988); 6) un prolongado reciclamiento de depósitos litorales durante múltiples eventos progradantes (Ferree *et al.*, 1988) y 7) una pérdida sindiagenética de feldespatos y fragmentos líticos en areniscas ricas en cuarzo (cuarzoarenitas de McBride, 1984; Lewis, 1984; McBride, 1987; Chandler, 1988). La base de datos de Paul Potter (1993) acerca de la composición de 350 muestras de ríos modernos y 250 muestras de arenas de playas de Sudamérica muestra que el 28% por ciento de las muestras de río y el 30% de las muestras de playa son arenas ricas en cuarzo. Para las muestras de arenas ricas en cuarzo, 85% de las de río y 92 % de las de playa ocurren al norte del Trópico de Capricornio (en la zona tropical). Potter (1993) sugiere que las arenas modernas ricas en cuarzo son producto de un largo intemperismo producido ya sea causado por el clima tropical o de un intemperismo químico intenso seguido de un enriquecimiento en cuarzo por la abrasión de las olas (Franzinelli y Potter, 1983, Potter, 1985; Johnsson, 1988, Ferre *et al.*, 1988, Johnsson *et al.*, 1991).

Para el caso del litoral de Tamiahua, las arenas se encuentran enriquecidas en cuarzo y se presentan algunas de las condiciones anteriormente mencionadas, aquí existen campos de dunas pequeñas activas (con un ancho de 100 a 150 metros) donde existe abrasión constante producida por el viento, especialmente durante los meses de otoño, fuertes vientos procedentes del norte favorecen el movimiento de la arena a lo largo de la costa (Martínez *et al.*, 1993) por lo que el transporte litoral es intenso en la respectiva playa y tiene una dirección preferencial N-S (Marín-Guzmán y Carranza-Edwards, 2011); existen las condiciones climáticas favorables para el intemperismo de minerales inestables a condiciones ambientales, que varían desde el clima tropical húmedo con una temperatura media anual de 25°C y 2150 mm de precipitación pluvial al subtropical semihúmedo con una temperatura y precipitación de 22°C y 1000 mm y finalmente además de existir rocas siliciclásticas (areniscas y lutitas) que están siendo intemperizadas en Tamiahua también existen la condiciones mencionadas por Ferre *et al.*,

1988, donde simultáneamente existe un reciclamiento constante de secuencias sedimentarias progradantes de depósitos eólicos y litorales del pleistoceno (cordones litorales) desde la última glaciación, que han formado la barrera arenosa de Cabo Rojo que delimita la laguna de Tamiahua

El litoral de Tuxpan presenta condiciones similares en cuanto al clima; al norte de la desembocadura del río Tuxpan existen cordones litorales que delimitan a la laguna de Tampamachoco, compuestos de dunas estables cubiertas por vegetación; y aquí también las corrientes litorales son dominantes en dirección N-S por lo que el transporte litoral influye mucho sobre la depositación y las arenas proceden del norte siendo transportadas constantemente por estas corrientes, reciclando estos depósitos eólicos y lacustres antiguos; así mismo las arenas de Tuxpan también son ricas en cuarzo y el tamaño de grano de grano es prácticamente similar al de las arenas de la playa de Tamiahua, salvo que en este lugar la asimetría en la granulometría de las arenas tiende a ser hacia los tamaños gruesos lo cual evidencia el aporte de material grueso procedente de los aportes de material detrítico del río Tuxpan.

4.5 GEOQUIMICA

La composición mineral y química de las arenas de playa es utilizada como indicador de procedencia, y también se utiliza para identificar las condiciones de intemperismo y, en algunos casos para discriminar entre ambientes tectónicos (Cullers, 1994a, 1994b; Cox y Lowe, 1996; Cullers, 2000; Armstrong-Altrin *et al.*, 2004; Carranza-Edwards *et al.*, 1998, Kasper-Zubillaga *et al.*, 2008). Sin embargo, la composición de las arenas de playa se encuentra influenciada por los procesos sedimentarios dentro de la cuenca de depósito, y el tipo de transporte que dispersa el sedimento dentro de la misma cuenca (Etemad-Saeed *et al.*, 2011; Armstrong-Altrin y Verma, 2005; Gosen *et al.*, 2009).

Los elementos traza tales como el Y, Sc, Cr, Th, Zr, Hf, Nb son los más adecuados tanto para determinar procedencia así como el ambiente tectónico, debido a su baja movilidad durante los procesos sedimentarios. Estos elementos se concentran preferentemente en minerales resistentes y no son liberados a causa del intemperismo así

mismo cuando los sedimentos son transportados, por lo que reflejan claramente el material parental del cual se originaron (McLennan *et al.*, 1993). Debido a estas razones, los elementos traza resultan más útiles en estudios de procedencia y discriminación de ambiente tectónico que los elementos mayores (Cullers, 1994a, 1994b; Bakkiaraj *et al.*, 2010; Armstrong-Altrin *et al.*, 2012, 2013).

Diversas investigaciones han sido realizadas utilizando la geoquímica de arenas con la finalidad de poder determinar la procedencia y discriminar entre ambientes tectónicos de cuencas sedimentarias en diferentes partes del mundo (Armstrong-Altrin., 2004; Nagarajan *et al.*, 2007a, 2007b; McLennan *et al.*, 1993; Ryan y Williams, 2007; Kasper-Zubillaga *et al.*, 1999, 2008, 2009, Carranza-Edwards *et al.*, 2001, 2009). Se ha observado que la distribución de elementos inmóviles tales como es La y Th (enriquecidos en rocas silíceas) así como el Sc, Cr, Co (enriquecidos en rocas básicas y relativo en rocas silíceas) han sido utilizados para relacionar la distribución de materiales de origen félsico o máfico en arenas de diferentes ambientes tectónicos (Borges y Huh, 2007; Borges *et al.*, 2008).

Cullers *et al.* (1988) han demostrado que el Ba y Co son abundantes en sedimentos terrígenos los cuales son utilizados como diagnósticos para diferenciar entre una fuente félsica de una máfica, respectivamente. La proporción La/Lu y también otras proporciones de elementos traza, pueden utilizarse para determinar la procedencia de las arenas de playa debido a que la mayoría de las rocas básicas contienen una baja proporción de La/Lu, mientras que rocas mas silíceas tienen una alta proporción La/Lu.

De forma similar, las variaciones en la composición geoquímica de las arenas de playa, reflejan cambios en la composición mineralógica debido a los efectos conjuntos del intemperismo y los procesos diagenéticos (Nesbitt *et al.*, 2006; Selvaraj y Chen, 2006; García *et al.*, 2004; Roddaz *et al.*, 2005,2006). Aunque minerales inestables y solubles son afectados durante el intemperismo; otros elementos químicamente inmóviles (REE, Th, Cr, Sc), son preservados en los sedimentos terrígenos, por lo que registran de manera mas sensible la señal química de su roca fuente. Por lo tanto, estos elementos y sus proporciones elementales son muy útiles para determinar la procedencia del sedimento.

4.5.1 Geoquímica de elementos mayores

En la Tabla 6, se muestran las concentraciones de elementos mayores analizados en las arenas de las dos playas en estudio así como las de los ríos Tuxpan y Cazones.

Crook (1974) subdivide a los sedimentos terrígenos en base al contenido de SiO_2 y el cociente relativo de K_2O/Na_2O en tres clases: rico en cuarzo (promedio de SiO_2 mayor a 89% y una relación $K_2O/Na_2O > 1$), contenido intermedio de cuarzo (promedio de SiO_2 entre 68-74% y una relación $K_2O/Na_2O < 1$); y pobre en cuarzo (promedio de SiO_2 menor a 68% y una relación $K_2O/Na_2O < 1$).

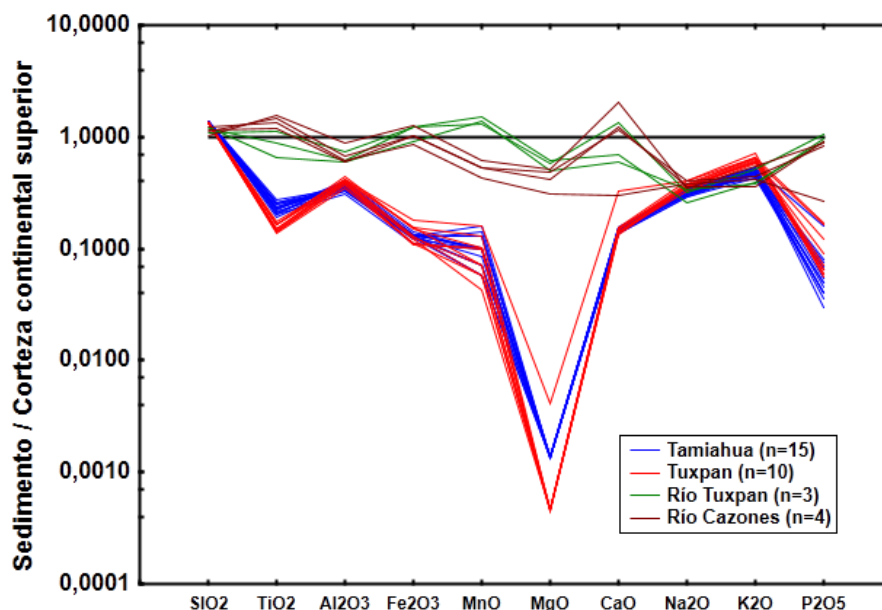


Figura 12. Diagrama normalizado de elementos mayores para las arenas de Playa de Tamiahua, Tuxpan y los ríos Tuxpan y Cazones, normalizados con el promedio de la corteza continental superior (Taylor y McLennan, 1985)

Tabla 6. Elementos mayores (%) en arenas de Tamiahua (THA), Tuxpan (TX), río Tuxpan (RTX) y río Cazones (RCAZ); Mz ϕ = Tamaño gráfico promedio; PXC= Pérdida por calcinación; CIA (Índice de alteración química).

	Mz ϕ	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	PXC	SUMA	CIA
THA01	2.62	89.79	0.12	5.63	0.54	0.01	0.00	0.66	1.33	1.81	0.01	0.42	100.32	51.30
THA02	2.80	91.51	0.10	4.76	0.50	0.01	0.00	0.58	1.14	1.45	0.01	0.26	100.31	51.46
THA03	2.82	90.55	0.11	5.46	0.56	0.00	0.00	0.58	1.22	1.56	0.01	0.42	100.49	53.43
THA04	2.78	88.59	0.10	5.83	0.59	0.01	0.00	0.62	1.25	1.69	0.00	0.33	99.02	53.68
THA05	2.80	90.20	0.12	5.85	0.61	0.01	0.00	0.66	1.30	1.74	0.01	0.36	100.85	52.91
THA06	2.80	90.03	0.10	6.01	0.59	0.01	0.00	0.64	1.33	1.80	0.03	0.43	100.97	53.14
THA07	2.78	91.14	0.12	5.05	0.57	0.01	0.00	0.62	1.28	1.46	0.01	0.45	100.70	51.20
THA08	2.80	91.20	0.11	5.08	0.54	0.01	0.00	0.61	1.22	1.55	0.01	0.31	100.63	51.52
THA09	2.76	90.91	0.13	5.08	0.59	0.01	0.00	0.59	1.13	1.60	0.02	0.35	100.40	52.24
THA10	2.83	90.52	0.14	5.26	0.60	0.01	0.00	0.64	1.25	1.65	0.01	0.31	100.39	51.26
THA11	2.77	89.19	0.11	6.20	0.64	0.01	0.00	0.65	1.34	1.79	0.01	0.46	100.40	53.79
THA12	2.75	90.25	0.12	5.33	0.59	0.01	0.00	0.63	1.16	1.60	0.01	0.34	100.04	52.72
THA13	2.83	89.71	0.13	5.60	0.57	0.01	0.00	0.62	1.19	1.62	0.01	0.42	99.88	53.64
THA14	2.77	90.00	0.11	5.36	0.58	0.00	0.00	0.63	1.17	1.65	0.02	0.42	99.95	52.40
THA15	2.79	90.52	0.10	5.59	0.60	0.01	0.00	0.58	1.30	1.71	0.01	0.42	100.83	52.50
TX6	2.68	89.25	0.07	5.91	0.49	0.01	0.00	0.59	1.27	1.97	0.01	0.56	100.11	52.81
TX7	2.73	89.69	0.07	5.33	0.50	0.00	0.00	0.56	1.39	2.00	0.02	0.52	100.09	49.35
TX8	2.70	89.01	0.08	5.99	0.55	0.00	0.00	0.57	1.41	2.13	0.01	0.54	100.31	51.43
TX9	2.73	86.69	0.08	6.28	0.80	0.01	0.01	1.35	1.54	2.17	0.03	0.17	99.13	46.13
TX10	2.69	88.42	0.08	6.19	0.70	0.01	0.00	0.63	1.39	2.05	0.03	0.39	99.89	52.30
TX11	2.71	88.54	0.07	6.08	0.58	0.00	0.00	0.63	1.43	2.22	0.01	0.64	100.19	50.77
TX12	2.71	88.10	0.09	6.28	0.70	0.01	0.00	0.63	1.50	2.24	0.01	0.62	100.17	50.97
TX13	2.73	89.93	0.07	5.56	0.51	0.01	0.00	0.59	1.35	2.04	0.01	0.03	100.09	50.25
TX14	2.71	89.12	0.07	5.76	0.56	0.01	0.00	0.59	1.40	2.05	0.02	0.46	100.05	50.95
TX15	2.70	87.45	0.08	6.61	0.68	0.01	0.00	0.65	1.57	2.40	0.01	0.61	100.08	50.57
RTX1	1.57	72.43	0.57	11.19	5.53	0.09	1.29	5.69	1.25	1.74	0.21	0.17	100.17	43.92
RTX2	0.38	79.88	0.33	9.15	4.13	0.10	1.08	2.50	1.32	1.31	0.20	0.19	100.19	52.95
RTX3	-1.55	77.70	0.45	9.47	5.48	0.11	1.34	2.91	1.02	1.34	0.18	0.32	100.32	52.96
RCAZ1	1.50	79.23	0.66	9.26	3.77	0.03	0.66	1.25	1.46	1.40	0.05	2.11	99.87	59.97
RCAZ2	-	73.53	0.56	8.66	4.38	0.04	0.87	4.97	1.34	1.17	0.18	4.51	100.21	40.92
RCAZ3	1.17	60.12	0.70	11.86	5.05	0.04	1.02	7.58	1.21	1.68	0.16	10.56	99.98	40.26
RCAZ4	0.77	71.34	0.69	9.80	4.38	0.04	1.02	4.58	1.51	1.43	0.16	4.66	99.59	44.21

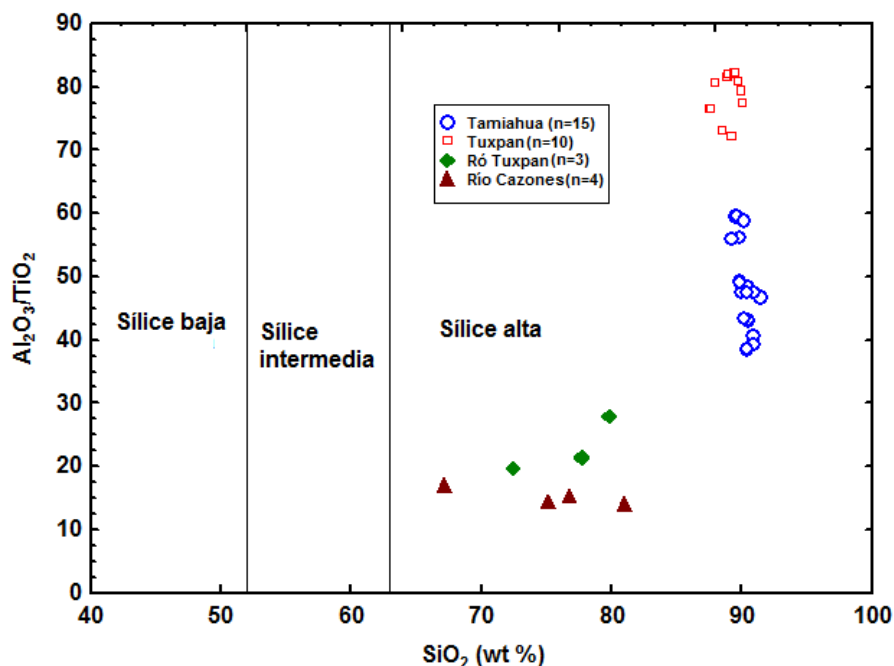


Figura 13. Relación entre Al_2O_3/TiO_2 vs SiO_2 para las arenas de playa en Tamiahua y Tuxpan, así como los ríos Tuxpan y Cazones (Le Bas et al., 1986). n= número de muestras.

El contenido promedio de SiO_2 de las arenas de Tamiahua es alto (90 ± 1.0) y presenta un cociente K_2O/Na_2O (1.33 ± 0.60) que tiene un valor mayor a 1, mientras que el contenido promedio de SiO_2 de las arenas de Tuxpan es un poco menor (89 ± 1.0) y con un cociente K_2O/Na_2O (1.49 ± 0.05) que también presenta un valor mayor a 1, los cuales indican la el enriquecimiento en cuarzo de los sedimentos de estas playas. El contenido promedio de SiO_2 de las arenas del río Tuxpan es menor (77 ± 4) y presenta un cociente K_2O/Na_2O (1.23 ± 0.17) que tiene un valor mayor a 1, mientras que el contenido promedio de SiO_2 de las arenas del río Cazones es un poco menor (71 ± 7.0) y con un cociente K_2O/Na_2O (1.04 ± 0.20) que también presenta un valor mayor a 1, los cuales indican que estos ríos tienen un contenido intermedio de cuarzo.

En la Figura 13 se muestra la composición que las arenas procedentes tanto de río como de playa son clasificadas como altas en silicio. Las arenas de Tamiahua ($SiO_2=89 - 92$

%), las de Tuxpan ($SiO_2=87 - 90$ %), las del río Tuxpan ($SiO_2=73 - 80$ %) y del río Cazones ($SiO_2=60 - 79$ %), con respecto al contenido de SiO_2 (Le Bas *et al.*, 1986).

La variación en la relación Al_2O_3/TiO_2 es mas amplia en las arenas de Tuxpan ($\sim 82 - 72$, 79 ± 4 , $n=10$), que en las arenas de Tamiahua ($\sim 38 - 59$, 48 ± 7 , $n=15$). Estas diferencias observadas en la relación Al_2O_3/TiO_2 entre las arenas de Tamiahua y Tuxpan se debe a las diferencias en el tamaño de grano entre las dos playas (Bakkiaraj *et al.*, 2010).

El contenido de Al_2O_3 , es relativamente mas bajo en las arenas de Tamiahua ($\sim 4.8 - 6.2$, 5.5 ± 0.6 , $n=15$), que en las arenas de Tuxpan ($\sim 5.3 - 6.6$, 6.00 ± 0.4 , $n=10$), esto puede explicarse debido a la selectividad de las arenas finas compuestas de cuarzo y que es efectuada por el transporte eólico/litoral que causa el incremento de sílice y por tanto el empobrecimiento de aluminio, mientras que en Tuxpan el transporte litoral predominante causa una redistribución de los aportes del sedimento arenoso de grano mas grueso del río Tuxpan, que contiene aluminosilicatos procedentes de rocas sedimentarias de las zonas aledañas (Figura 14).

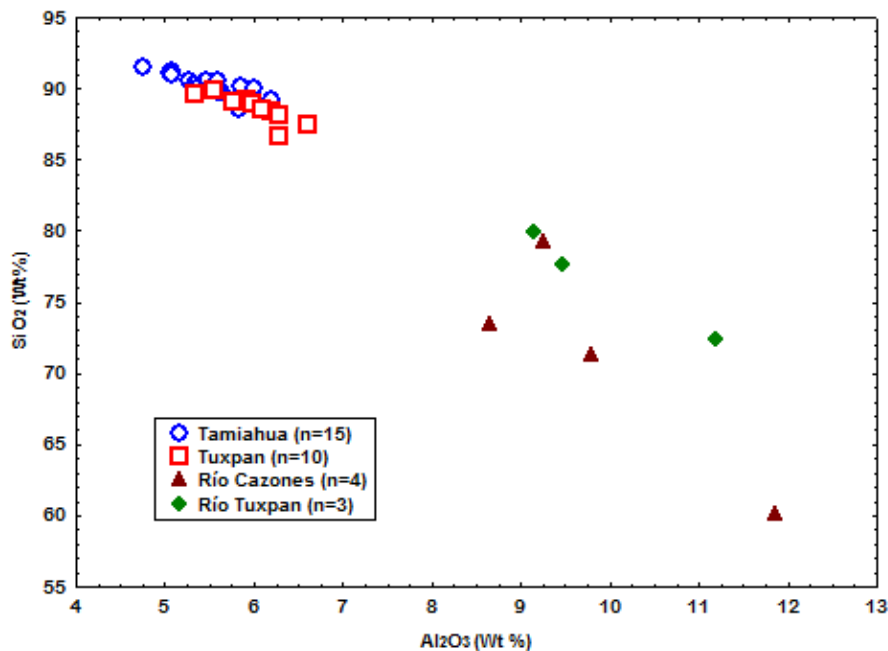


Figura 14. Diagrama binario SiO_2 vs Al_2O_3 para las arenas de Playa de Tuxpan, Tamiahua, ríos Tuxpan y Cazones.

Las relaciones entre SiO_2/Al_2O_3 y K_2O/Al_2O_3 dependen de la madurez de los sedimentos (Le Maitre, 1976). La relación SiO_2/Al_2O_3 tiende a incrementarse cuando mejora la clasificación de los sedimentos; los valores promedio de SiO_2/Al_2O_3 son de ~3 en rocas máficas (basaltos); las rocas ígneas intermedias van de 3 a 5 y en rocas ácidas el valor se aproxima a ~5, tales como riolitas y granitos, mientras que valores mayores a 5 o 6 se presentan en rocas sedimentarias. Por otra parte, la relación K_2O/Al_2O_3 tiene un decremento cuando disminuye el tamaño de grano (Armstrong-Altrin *et al.*, 2012), como resultado del efecto de dilución del cuarzo, y a su vez, las relaciones promedio K_2O/Al_2O_3 de una playa tienden a incrementarse cuando cambia la composición de la roca fuente en el orden de máfica<intermedia<félsica.

La relación SiO_2/Al_2O_3 (Figura 14) de las arenas de Tamiahua es más alta (17 ± 2) que en Tuxpan (15 ± 2), mientras que es baja tanto para el Río Tuxpan (8 ± 1) como el río Cazones (7 ± 1). El incremento en las relaciones SiO_2/Al_2O_3 de Tamiahua con respecto de Tuxpan indica que la madurez composicional es más alta para las arenas de Tamiahua y difiere por mucho a los sedimentos inmaduros de los ríos Tuxpan y Cazones.

La relación K_2O/Al_2O_3 es más alta en las arenas de Tuxpan ($0.35 \pm .01$) que en las arenas de Tamiahua ($0.30 \pm .01$) dado que los sedimentos de Tuxpan (2.68 a 2.77ϕ) son mas gruesos que los de Tamiahua (2.62 a 2.83ϕ), esto puede deberse a la dinámica mas energética del transporte litoral en Tuxpan que causa una mezcla de arenas de la playa con aportes del rio Tuxpan.

La relación K_2O/Al_2O_3 es baja para los sedimentos del río Tuxpan (0.147 ± 0.01) y del río Cazones (0.143 ± 0.01), sin embargo las muestras de río tienen este comportamiento debido a la gran heterogeneidad de sus componentes, donde el componente limo-arcilloso hace que baje la relación K_2O/Al_2O_3 .

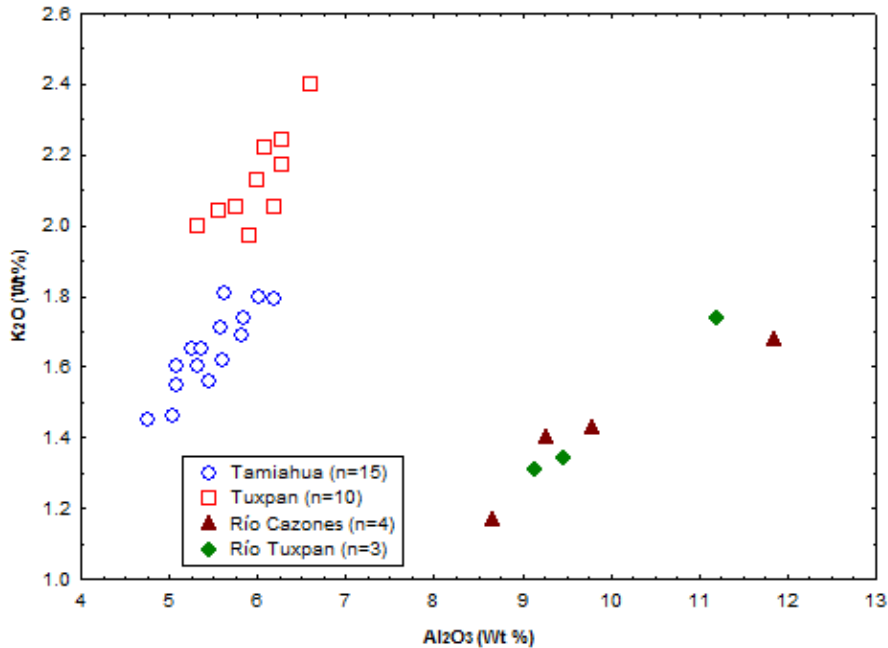


Figura 15. Diagrama binario K_2O vs Al_2O_3 para las arenas de Playa de Tuxpan, Tamiahua, ríos Tuxpan y Cazones.

Las mediciones de correlación entre TiO_2 vs Al_2O_3 (Figura 16) en las arenas de Tamiahua ($r=-0.23$, $n=15$) es pequeña y negativa, mientras que la de las arenas Tuxpan es mas alta y de valor positivo (0.68 , $n=10$), pero menor que las del río Tuxpan ($r=0.93$, $n=3$), y ésta es mayor que las del río Cazones ($r=0.75$, $n=4$). El valor del coeficiente de correlación para TiO_2 vs Fe_2O_3 (Figura 17) es bajo en las arenas de Tamiahua ($r=0.15$, $n=15$), mientras que es mas alto en las arenas de Tuxpan ($r=0.73$, $n=10$) y las del río Tuxpan ($r=0.88$, $n=3$), mientras que es bajo en las arenas del Río Cazones ($r=0.27$, $n=4$). Los valores de correlación altos entre Ti y Fe en Tuxpan, indican que el Río Tuxpan aporta cierta cantidad de minerales pesados a la playa de Tuxpan, mientras que el río cazones no contribuye con aportes en esta playa, a su vez que la correlación negativa existente en Tamiahua revela que no hay presencia de minerales pesados.

Aunque las correlaciones anteriores indican que no existen minerales pesados en Tamiahua, el contenido de Ti es mayor en las arenas de esta playa (0.12 ± 0.01 $n=15$) que las de Tuxpan (0.076 ± 0.001 $n=10$); y esto puede explicarse debido a que es común que el

cuarzo tenga como inclusión sólida a minerales tales como el rutilo y puesto que las arenas de Tamiahua son sumamente ricas en cuarzo, el contenido se eleva casi al doble.

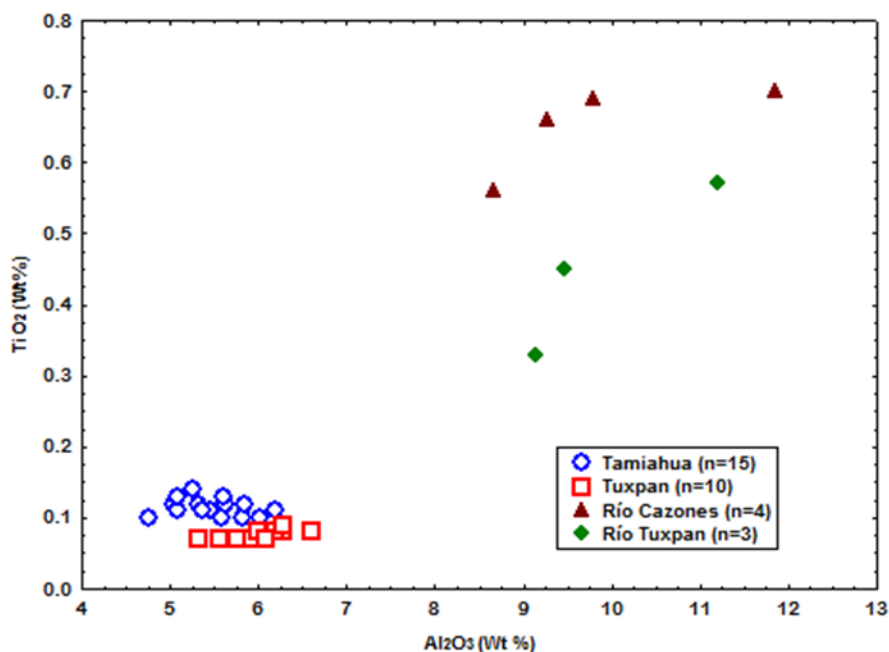


Figura 16. Diagrama binario TiO_2 vs Al_2O_3 para las arenas de Playa de Tuxpan, Tamiahua, ríos Tuxpan y Cazones.

El Calcio se encuentra empobrecido en las arenas de Tamiahua (0.115 ± 0.03 , $n=15$) y en las arenas de Tuxpan (0.679 ± 0.23 , $n=10$), la baja concentración de CaO y el alto contenido de SiO_2 implican una gran depositación de terrígenos y una ausencia de plagioclasa cálcica (rocas intermedias y máficas) en la región donde se encuentra la roca fuente (Bhatia, 1983). El río Tuxpan (3.7 ± 1.4 , $n=3$) presenta valores mas bajos de Ca que el río Cazones (4.6 ± 2.3 , $n=4$).

Las concentraciones del resto de los elementos mayores de las arenas de playa de Tuxpan y Tamiahua no son significativas; en cuanto a los contenidos de MnO y P_2O_5 estudios geoquímicos sugieren que la concentración de manganeso y fósforo está restringida por la concentración de carbonato (Barber, 1976), el cual se encuentra ausente en los sedimentos; y la ausencia de Magnesio en todas las muestras se debe a la inexistencia de minerales de origen máfico en las arenas.

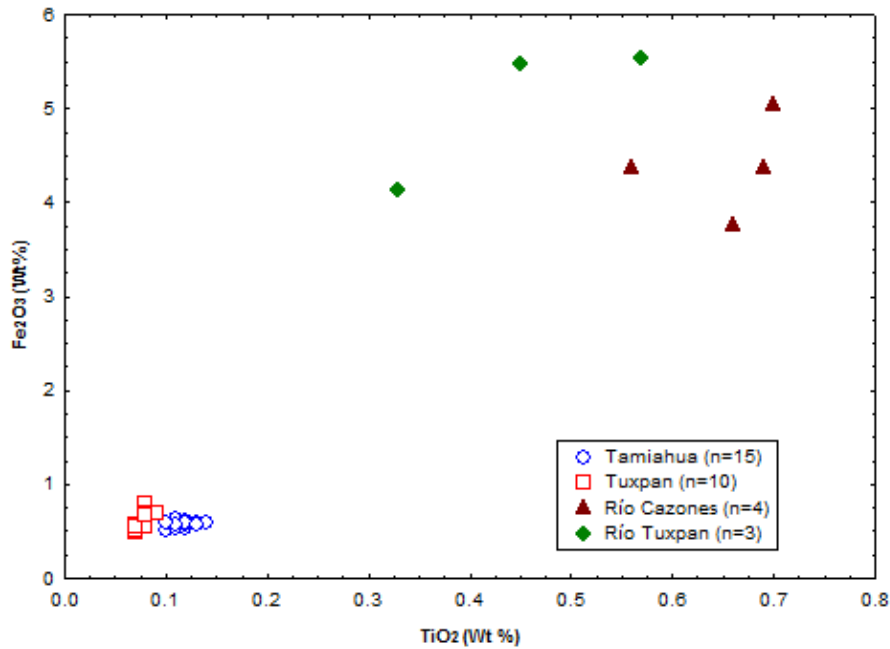


Figura 17. Diagrama binario Fe_2O_3 vs TiO_2 para las arenas de Playa de Tuxpan, Tamiahua, ríos Tuxpan y Cazones.

En el diagrama de clasificación geoquímica de Na_2O/K_2O vs SiO_2/Al_2O_3 (Figura 18) (Pettijohn *et al.*, 1972), las arenas de Tuxpan como Tamiahua cayeron dentro del campo de las subarcosas. Las arenas de los Ríos Tuxpan y Cazones son clasificadas como litoarenitas.

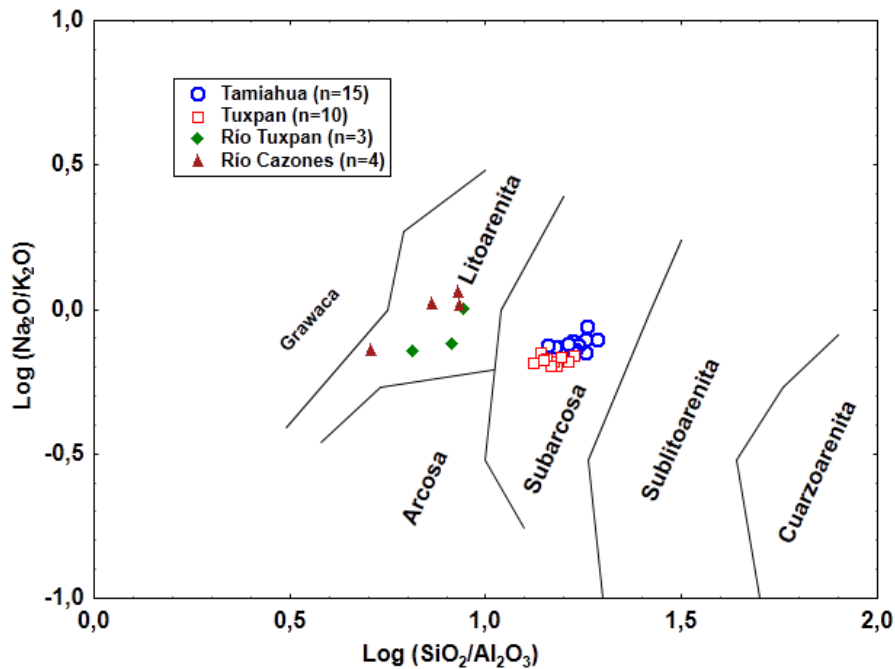


Figura 18. Clasificación geoquímica de arenas de playa (Tuxpan, Tamiahua, Ríos Tuxpan y Cazones) usando $\log(Na_2O/K_2O)$ vs $\log(SiO_2/Al_2O_3)$ (Pettijohn *et al.*, 1972)

4.3.2 Geoquímica de elementos traza

Las concentraciones de elementos traza se presentan en la Tabla 7 y en la Figura 19 se presentan los patrones de comportamiento con respecto a la corteza continental. En comparación con los valores de la corteza continental superior (Taylor y McLennan, 1985), la concentración de las muestras de arena de playa de Tuxpan y Tamiahua muestran un comportamiento similar, encontrándose sumamente empobrecidas en la mayoría de los elementos traza y solo muestran un enriquecimiento en Ba y Ta, con concentraciones relativamente menores de Sc, Cu, Rb y Sr, las arenas de Tuxpan muestran una concentración mayor de Sc. Los ríos muestran otro comportamiento; el río Tuxpan se encuentra enriquecido en V, Ni, Sr y con contenidos menores de Sc, Cr, Co, Cu, Zn y Ba.

El Río Cazonos presenta concentraciones mayores que el río Tuxpan en V, Cr, Ni, Cu y Zn pero menores concentraciones de Ba, el resto de los elementos traza se encuentran empobrecidos.

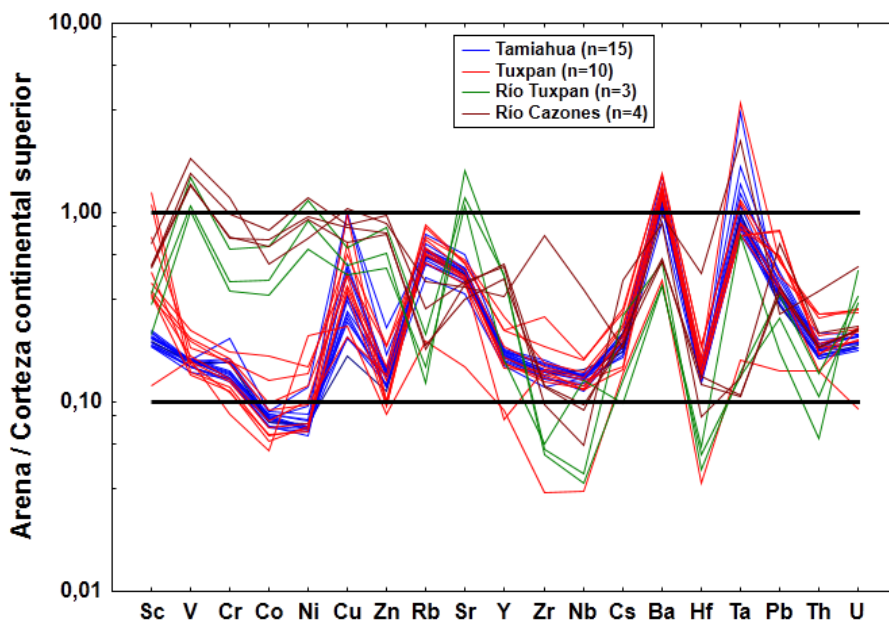


Figura 19. Diagrama normalizado multielementos para las arenas de playa de Tamiahua, Tuxpan, río Tuxpan y río Cazonos; normalizados con el promedio de la corteza continental superior (Taylor y McLennan, 1985).

Los procesos que controlan la distribución de los elementos traza en los sedimentos pueden ser estudiados usando normalizaciones similares a los diagramas *spider* que se usan en petrología ígnea aunque estos no se encuentran tan extensamente desarrollados (Figura 22). Cullers (1988) menciona que los feldespatos controlan la concentración de Ba, Na, Rb y Ce, mientras que los minerales ferromagnesianos controlan las concentraciones de Ta, Fe, Co, Sc y Cr; el Hf es controlado por el zircón, mientras que las REE y el Th son controladas por la esfena.

Tabla 7. Concentraciones de elementos traza (en ppm).

Elementos Traza	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Rb	Sr	Y
THA 1	3.21	9.19	4.46	0.74	1.44	9.03	9.93	72.44	176.77	4.12
THA 2	2.93	10.21	5.08	0.83	1.50	12.16	9.90	65.00	167.97	4.01
THA 3	2.80	9.99	5.68	0.83	1.42	9.12	10.14	64.63	162.36	4.00
THA 4	3.16	10.01	4.71	0.81	1.49	7.49	10.80	86.64	208.69	4.18
THA 5	2.93	9.95	7.57	0.89	2.38	25.22	12.55	63.00	154.28	3.90
THA 6	3.06	10.06	5.00	0.87	1.61	24.52	17.58	70.21	164.12	3.92
THA7	2.72	9.18	4.65	0.75	1.33	12.71	10.34	60.33	156.69	3.82
THA 8	2.83	9.28	4.63	0.79	1.46	7.34	8.50	66.03	172.93	3.62
THA 9	3.02	10.02	4.93	0.80	1.44	6.99	8.72	69.13	172.05	3.88
THA 10	2.83	9.71	5.61	0.78	1.53	4.37	8.16	65.68	166.10	3.77
THA 11	3.25	10.02	4.69	0.87	1.60	6.62	9.64	77.36	177.43	4.08
THA12	2.67	8.69	4.65	0.73	1.40	8.65	8.57	51.10	130.76	3.42
THA 13	2.71	9.81	4.89	0.85	1.46	5.47	8.75	72.01	179.12	3.79
THA14	2.99	9.85	5.95	0.82	1.92	13.45	10.39	59.77	148.27	4.08
THA 15	2.68	9.27	5.78	0.90	1.73	5.38	9.65	70.61	168.74	3.67
TX6	15.07	8.55	4.17	0.66	1.43	24.62	7.09	68.92	161.61	3.48
TX7	4.97	8.34	4.00	0.62	1.49	9.47	6.77	72.71	161.11	3.55
TX8	6.64	9.47	3.95	0.68	1.39	17.18	6.81	71.34	157.65	3.82
TX9	5.76	14.31	6.47	1.74	3.09	12.03	14.01	83.38	197.98	6.22
TX10	10.16	11.52	5.75	1.29	2.81	15.13	14.07	60.85	147.65	3.30
TX11	17.49	9.83	4.49	0.74	1.55	9.90	9.19	67.09	152.85	1.77
TX12	5.24	13.08	5.94	0.99	2.46	10.27	10.89	97.36	189.44	5.27
TX13	1.66	9.94	3.04	0.55	4.47	6.24	6.13	23.40	53.98	2.00
TX14	5.07	10.50	4.60	0.79	2.04	11.46	7.25	81.22	171.46	4.32
TX15	4.80	12.51	5.54	0.91	1.92	5.48	9.81	94.19	188.26	5.27
RTX1	5.10	91.76	22.62	6.58	2.20	16.41	59.60	25.41	422.27	10.30
RTX2	3.10	60.61	13.59	3.68	1.88	11.76	36.22	17.26	379.67	3.68
RTX3	4.45	64.85	15.24	4.43	1.12	13.15	43.55	14.11	582.48	10.15
RCAZ1	9.34	115.01	42.14	5.31	14.66	26.13	62.71	48.17	140.97	7.92
RCAZ2	7.16	84.42	25.78	7.21	18.90	21.03	55.91	21.31	147.13	11.81
RCAZ3	7.02	96.95	34.56	8.14	24.16	21.63	68.47	34.80	150.94	11.35
RCAZ4	6.98	83.45	25.99	6.59	18.33	17.54	54.21	22.28	122.54	9.75

Continuación.

Elementos Traza	Zr	Nb	Cs	Ba	Hf	Ta	Pb	Th	U
THA 1	30.43	3.43	1.22	704.02	0.87	2.04	7.77	2.18	0.63
THA 2	28.39	3.43	1.09	630.86	0.82	2.15	7.43	2.02	0.57
THA 3	28.33	3.53	1.15	624.16	0.83	2.40	7.58	2.05	0.57
THA 4	31.73	3.44	1.24	860.57	0.93	2.00	8.86	2.11	0.63
THA 5	27.42	3.24	1.15	597.21	0.78	3.11	8.17	1.99	0.57
THA 6	27.44	3.33	1.29	650.77	0.77	2.78	9.64	2.17	0.61
THA7	25.29	3.15	1.00	596.84	0.75	1.87	7.06	1.82	0.54
THA 8	25.14	3.02	1.04	662.93	0.73	1.80	6.59	1.82	0.53
THA 9	27.78	3.40	1.09	683.04	0.81	1.92	7.27	2.00	0.54
THA 10	26.51	3.73	1.04	649.69	0.77	2.16	6.42	1.87	0.56
THA 11	29.56	3.35	1.29	733.68	0.86	1.92	8.13	2.28	0.61
THA12	22.91	3.35	0.96	487.59	0.75	7.39	6.61	1.87	0.54
THA 13	27.41	3.47	1.11	720.38	0.86	1.90	7.05	2.46	0.64
THA14	30.14	3.40	1.14	578.37	0.89	3.88	9.26	2.10	0.58
THA 15	25.84	2.85	1.12	698.41	0.75	1.70	7.11	1.90	0.54
TX6	25.46	2.92	1.11	667.07	0.83	1.66	16.05	1.93	0.59
TX7	24.47	2.93	1.26	700.43	0.78	1.69	7.82	2.05	0.59
TX8	26.40	3.07	1.19	685.30	0.90	1.82	11.90	2.16	0.66
TX9	30.72	3.61	1.42	774.02	1.00	8.31	11.00	2.94	0.87
TX10	27.94	2.90	0.83	662.34	0.81	1.68	15.78	1.91	0.70
TX11	28.26	3.25	0.86	739.99	0.94	1.94	8.26	1.56	0.68
TX12	53.23	4.21	1.65	880.76	1.13	2.57	11.04	3.14	0.86
TX13	6.28	0.85	0.79	242.14	0.21	0.37	2.94	1.58	0.26
TX14	29.33	3.37	1.38	750.79	0.91	1.92	11.56	2.38	0.68
TX15	37.22	4.18	1.74	855.17	1.15	2.47	9.31	3.12	0.83
RTX1	10.62	1.05	1.61	300.03	0.26	0.32	7.33	1.52	1.02
RTX2	11.40	3.23	0.55	228.19	0.34	1.67	3.66	0.68	1.38
RTX3	10.00	0.94	0.73	225.34	0.30	0.30	5.56	1.15	0.93
RCAZ1	143.66	9.86	1.08	534.68	2.76	5.29	5.87	4.15	1.44
RCAZ2	23.03	2.43	1.14	305.82	0.79	0.24	7.53	2.07	0.68
RCAZ3	18.39	1.48	2.46	478.73	0.49	0.30	13.71	2.46	0.70
RCAZ4	22.61	2.25	1.30	313.36	0.71	0.23	8.16	2.12	0.67

4.3.2.1 Elementos litófilos de radio iónico grande (LILE): Rb, Ba, Sr, Th y U.

La buena correlación entre K_2O/Al_2O_3 vs. Rb/Al_2O_3 ($r=0.84$, $n=32$; Figura 20) y entre K_2O/Al_2O_3 vs. Ba/Al_2O_3 ($r=0.82$, $n=32$; Figura 21), es consistente con la presencia de feldespatos (Cullers, 1988), ya que tanto en las playas de Tuxpan y Tamiahua estos elementos traza se encuentran controlados por la presencia de feldespatos (Figura 23 y 24); el contenido tanto de Ba (658.57 ± 81.60) y Rb (67.60 ± 7.95) es mas alto en las arenas de Tuxpan que las arenas de Tamiahua, con un contenido de Ba (695.80 ± 166.92) y Rb (72.05 ± 19.67); mientras que en las arenas de los ríos Tuxpan y Cazonos se encuentran empobrecidas en estos elementos debido a que son sedimentos inmaduros.

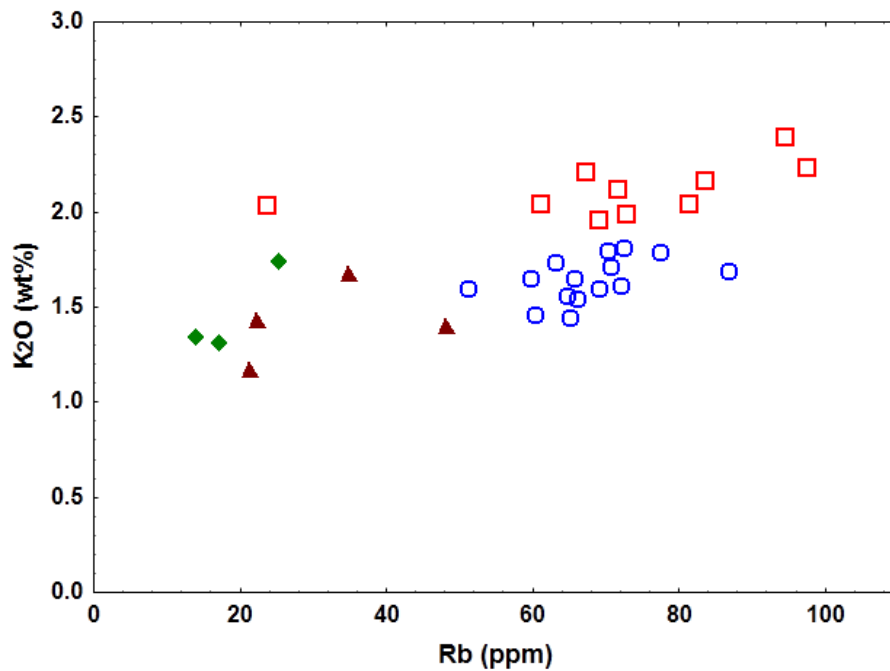


Figura 20. Diagrama binario K_2O vs. Rb para las arenas de Playa de Tuxpan, Tamiahua, ríos Tuxpan y Cazonos.

Las muestras estudiadas de las áreas de Tuxpan y Tamiahua tienen concentraciones altas de Ba y Rb, mientras que el Sr, Th y U se encuentran empobrecidos. El comportamiento de estos elementos es distinto en cuanto a las arenas del río Tuxpan y Cazonos, que se encuentran empobrecidas en Rb y Ba, pero con concentraciones más altas de Sr, Th y U.

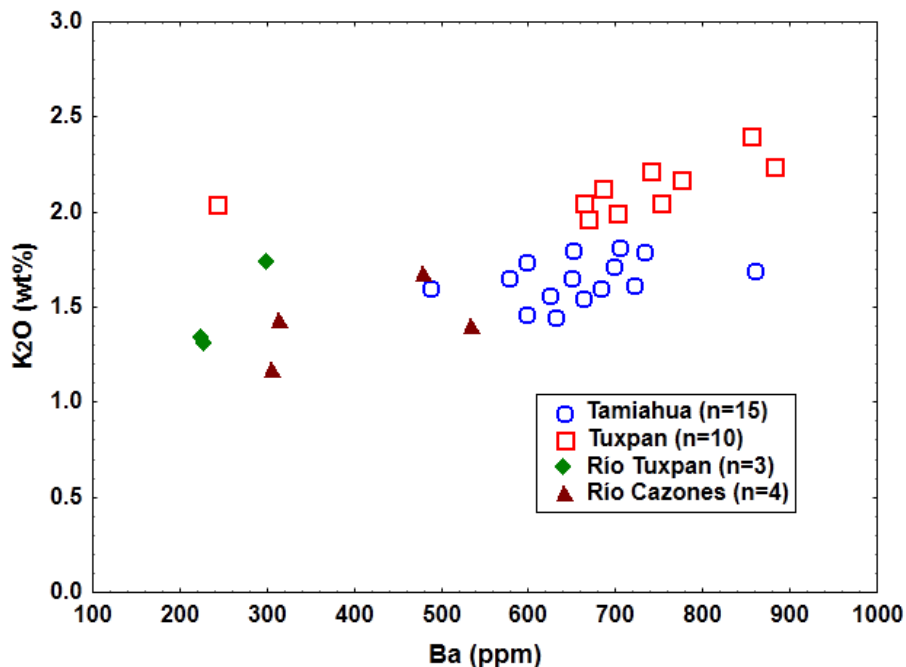


Figura 21. Diagrama binario K_2O vs. Ba para las arenas de Playa de Tuxpan, Tamiahua, ríos Tuxpan y Cazones.

4.3.2.2 Elementos de alto potencial de ionización (HFSE): Y, Zr, Nb, Hf.

Los elementos de alto potencial de ionización se encuentran sumamente empobrecidos (Figura 19) tanto para las arenas playas de Tuxpan y Tamiahua así como las de los Ríos Tuxpan y Cazones. Sin embargo, las concentraciones en las arenas de Tuxpan de Zr y Hf son más altas que en las arenas de Tamiahua, lo cual indica el efecto de la clasificación o sorteo de los sedimentos durante su transporte. Además existe una buena correlación positiva observada entre el Hf y Zr ($r=0.97$, $n=32$; Figura 22), para las muestras estudiadas, lo cual indica que ambos elementos tienen un origen común en el mineral zircón (Figura 23 y 24).

4.3.2.3 Elementos traza de transición (TTE): V, Cr, Co, Cu, Ni y Sc.

Estos elementos tienen un comportamiento similar tanto en las arenas de Tamiahua y Tuxpan y se encuentran empobrecidos, con excepción del Cu y en el caso particular de Tuxpan el Sc se encuentra en mayores concentraciones. La concentración de Ni (~1-5) son sumamente bajas para las muestras de arena tanto de Tamiahua y Tuxpan, pero altas para los ríos Tuxpan y Cazones (~18-24). Los contenidos de Cr son bajos para las arenas de

Tamiahua (~5-8) y Tuxpan (~3-7), existiendo una concentración mayor en las arenas del río Tuxpan (~15-23) y altas para las del río Cazones (~26-42).

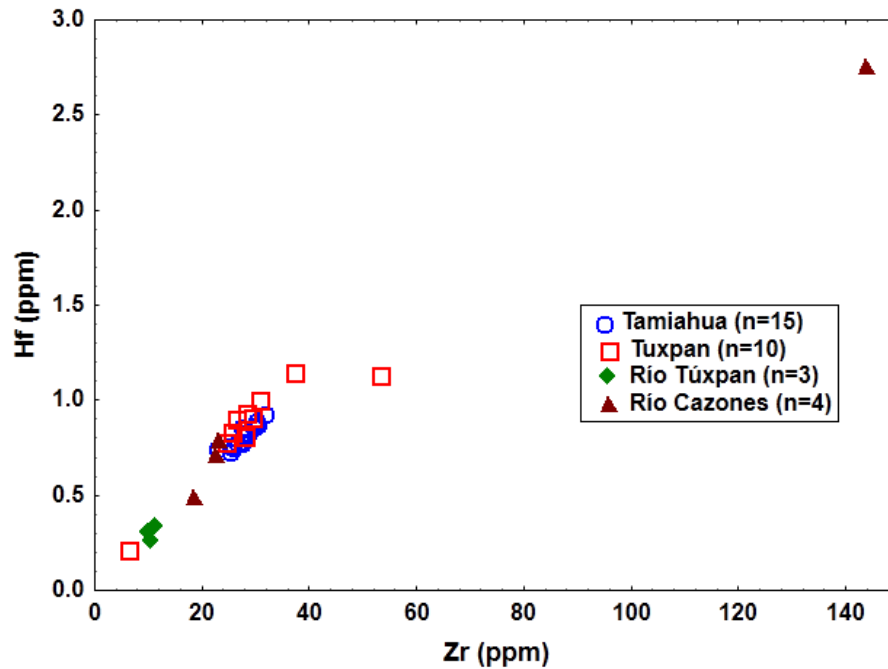


Figura 22. Diagrama binario *Hf* vs. *Zr* para las arenas de Playa de Tuxpan, Tamiahua, ríos Tuxpan y Cazones.

El Co se encuentra totalmente empobrecido con concentraciones menores a 1 ppm en las arenas de Tuxpan y Tamiahua, mientras que el río Cazones (Co= ~5-8) tiene mayor concentración de Co que el río Tuxpan (~4-7). Los contenidos de Cu son similares en las arenas de Tamiahua (~4-25) y las de Tuxpan (~6-25), pero menores en las arenas de río Tuxpan (~12-16) y altos para el río Cazones (~18-26). Las concentraciones de V son bajas y tienen un comportamiento similar en las arenas de Tuxpan y Tamiahua (~8-14), pero son sumamente altas para los ríos Tuxpan y Cazones (~61-115). Solo el que tiene un comportamiento diferente es el Sc, este elemento se encuentra en mayor concentración en las arenas de Tuxpan (~2-17) que en las arenas de Tamiahua (~3), los ríos Tuxpan (~3-5) y Cazones (~7-9). La similitud en el comportamiento de las concentraciones de estos elementos traza en las arenas de Tamiahua y Tuxpan parecen indicar una roca fuente similar, sin embargo, los ríos parecen aportar sedimentos originados de otro tipo de material parental.

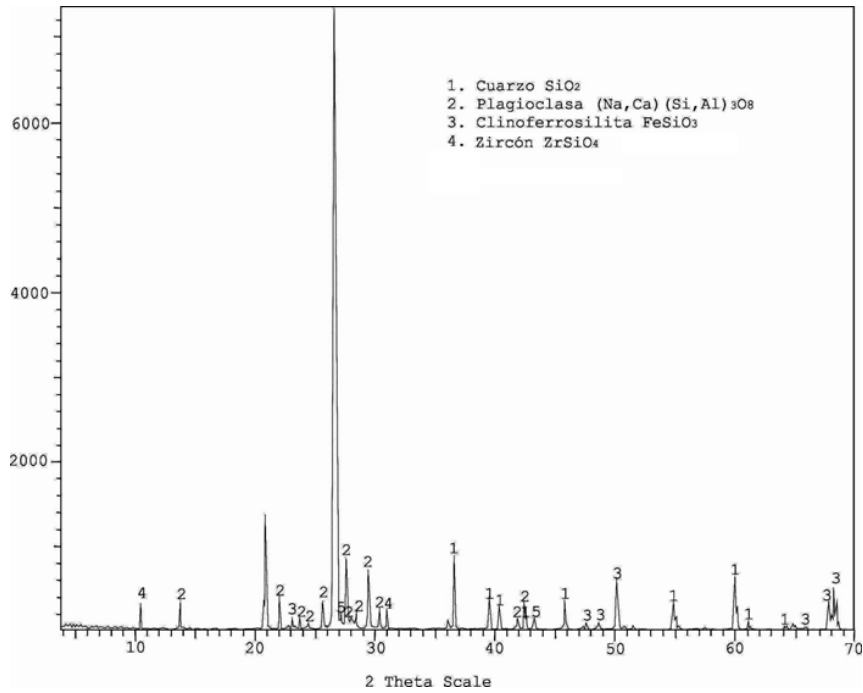


Figura 23. Difractograma de la muestra THA9 de la playa de Tamiahua.

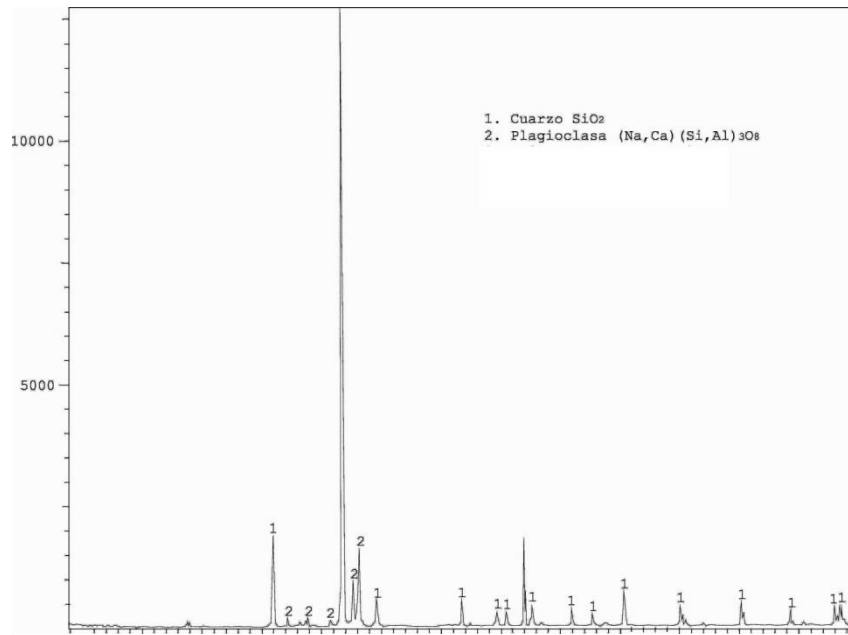


Figura 24. Difractograma de la muestra TX15 de la playa de Tuxpan.

4.4.3 Geoquímica de Tierras Raras

Los elementos lantánidos así como el Sc e Y comprenden el grupo de las “tierras raras” (*REE* por sus siglas en inglés) y no se encuentran como metales libres en la naturaleza. En la mayoría de los casos se encuentran presentes en las estructuras cristalinas de los minerales en forma covalente o iónica, bordeados por otras tierras raras y elementos no metálicos. Minerales como monazita, zircón, xenotima y esfena son minerales accesorios muy comunes en rocas graníticas y metamórficas (gneis). Debido a su resistencia al intemperismo químico y a su alta densidad, estos minerales son muy estables en ambientes cercanos a la superficie y son frecuentemente encontrados en depósitos de placer. Las tierras raras en sedimentos terrígenos se encuentran esencialmente en la fracción limosa (Cullers, 1988) y representan un buen indicador sobre la procedencia (McLennan *et al.*, 1990, 1993; McLennan, 2001)

Las diferencias en las concentraciones de tierras raras en los sedimentos depende de la composición de la roca fuente, de la adición de minerales accesorios y algunas veces de los procesos de intemperismo químico en el área donde se originan (Banfield y Eggleton, 1989). El fraccionamiento que puede afectar la distribución de tierras raras en los sedimentos fue discutido por McLennan (1989), donde sugiere que algunos minerales tales como el zircón, monazita y allanita son concentrados durante la sedimentación, debido a su alta densidad.

Las concentraciones de tierras raras (Tabla 8) de las arenas de playa de Tamiahua, Tuxpan, Río Tuxpan y Río Cazones, fueron normalizadas con valores de condrita (Taylor y McLennan, 1985), y se muestran en la Figura 25a, b, c, respectivamente. La concentración de ΣTR no varía significativamente entre las arenas de Tamiahua ($\sim 25-32$; $n=15$), Tuxpan ($\sim 27-41$; $n=10$), y río Tuxpan ($\sim 24-41$; $n=3$), siendo mayor la concentración en el río cazones ($\sim 64-72$; $n=4$).

Tabla 8. Concentraciones de tierras raras (en ppm).

Elementos REE	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
THA 1	7.68	13.10	1.58	5.59	0.99	0.51	0.93	0.13	0.74	0.15	0.46	0.06	0.46	0.07
THA 2	6.90	12.33	1.43	5.06	0.92	0.49	0.87	0.12	0.70	0.14	0.43	0.06	0.44	0.07
THA 3	6.73	11.96	1.40	5.00	0.89	0.48	0.85	0.12	0.69	0.14	0.43	0.06	0.45	0.07
THA 4	6.93	12.09	1.42	5.08	0.92	0.53	0.88	0.12	0.74	0.16	0.47	0.07	0.47	0.07
THA 5	6.74	12.01	1.40	5.01	0.89	0.49	0.83	0.12	0.68	0.14	0.42	0.06	0.43	0.06
THA 6	7.09	12.51	1.48	5.20	0.93	0.51	0.87	0.12	0.68	0.14	0.42	0.06	0.43	0.06
THA7	6.29	11.37	1.32	4.70	0.85	0.45	0.82	0.11	0.68	0.13	0.42	0.06	0.42	0.06
THA 8	6.37	11.49	1.31	4.76	0.83	0.45	0.78	0.11	0.63	0.14	0.40	0.06	0.42	0.06
THA 9	6.63	11.81	1.37	4.90	0.87	0.46	0.83	0.12	0.67	0.14	0.42	0.06	0.43	0.06
THA 10	6.74	11.90	1.37	4.94	0.87	0.45	0.82	0.11	0.65	0.14	0.42	0.06	0.42	0.06
THA 11	7.27	12.73	1.50	5.38	0.96	0.51	0.92	0.12	0.72	0.14	0.45	0.07	0.47	0.07
THA12	5.83	10.21	1.20	4.30	0.79	0.46	0.73	0.10	0.60	0.15	0.38	0.06	0.42	0.06
THA 13	6.86	11.69	1.35	4.93	0.86	0.57	0.81	0.11	0.67	0.23	0.42	0.06	0.53	0.06
THA14	8.11	14.51	1.65	5.83	1.00	0.50	0.96	0.12	0.71	0.15	0.44	0.07	0.45	0.07
THA 15	6.48	11.13	1.33	4.77	0.84	0.48	0.82	0.11	0.63	0.13	0.40	0.06	0.42	0.06
TX6	6.36	11.03	1.30	4.69	0.84	0.51	0.80	0.11	0.64	0.13	0.41	0.06	0.41	0.06
TX7	6.69	11.41	1.39	5.01	0.89	0.50	0.81	0.11	0.66	0.13	0.40	0.06	0.41	0.06
TX8	6.68	11.50	1.42	5.09	0.90	0.51	0.85	0.12	0.69	0.14	0.44	0.06	0.44	0.07
TX9	10.43	20.36	2.38	8.74	1.66	0.67	1.50	0.21	1.16	0.22	0.67	0.09	0.65	0.09
TX10	6.58	11.73	1.53	5.63	1.06	0.52	0.96	0.13	0.74	0.14	0.42	0.06	0.41	0.06
TX11	3.87	7.58	0.95	3.50	0.65	0.40	0.58	0.08	0.49	0.10	0.30	0.04	0.30	0.04
TX12	9.26	17.51	1.97	6.96	1.28	0.64	1.17	0.17	0.94	0.19	0.58	0.08	0.58	0.09
TX13	5.21	9.55	1.21	4.41	0.77	0.21	0.69	0.09	0.42	0.08	0.21	0.03	0.18	0.03
TX14	7.84	13.39	1.67	5.83	1.02	0.57	0.97	0.13	0.77	0.15	0.48	0.07	0.47	0.07
TX15	9.23	15.39	1.93	7.01	1.23	0.65	1.17	0.16	0.94	0.19	0.60	0.08	0.59	0.09
RTX1	8.06	13.12	2.20	9.06	2.08	0.49	2.13	0.30	1.71	0.32	0.86	0.11	0.70	0.10
RTX2	5.24	8.32	1.28	5.15	1.02	0.25	1.03	0.15	0.84	0.17	0.48	0.06	0.39	0.06
RTX3	7.98	11.76	1.99	8.40	1.86	0.45	1.94	0.28	1.59	0.31	0.87	0.11	0.73	0.10
RCAZ1	10.43	30.94	2.88	10.78	2.04	0.66	1.85	0.27	1.55	0.32	1.01	0.15	1.04	0.15
RCAZ2	10.49	32.78	3.21	13.41	3.14	0.74	3.20	0.46	2.43	0.44	1.17	0.15	0.93	0.13
RCAZ3	10.17	29.86	3.05	12.74	3.01	0.77	3.03	0.42	2.26	0.41	1.11	0.14	0.88	0.12
RCAZ4	8.89	29.46	2.92	11.99	2.71	0.63	2.72	0.39	2.05	0.37	0.99	0.13	0.81	0.11

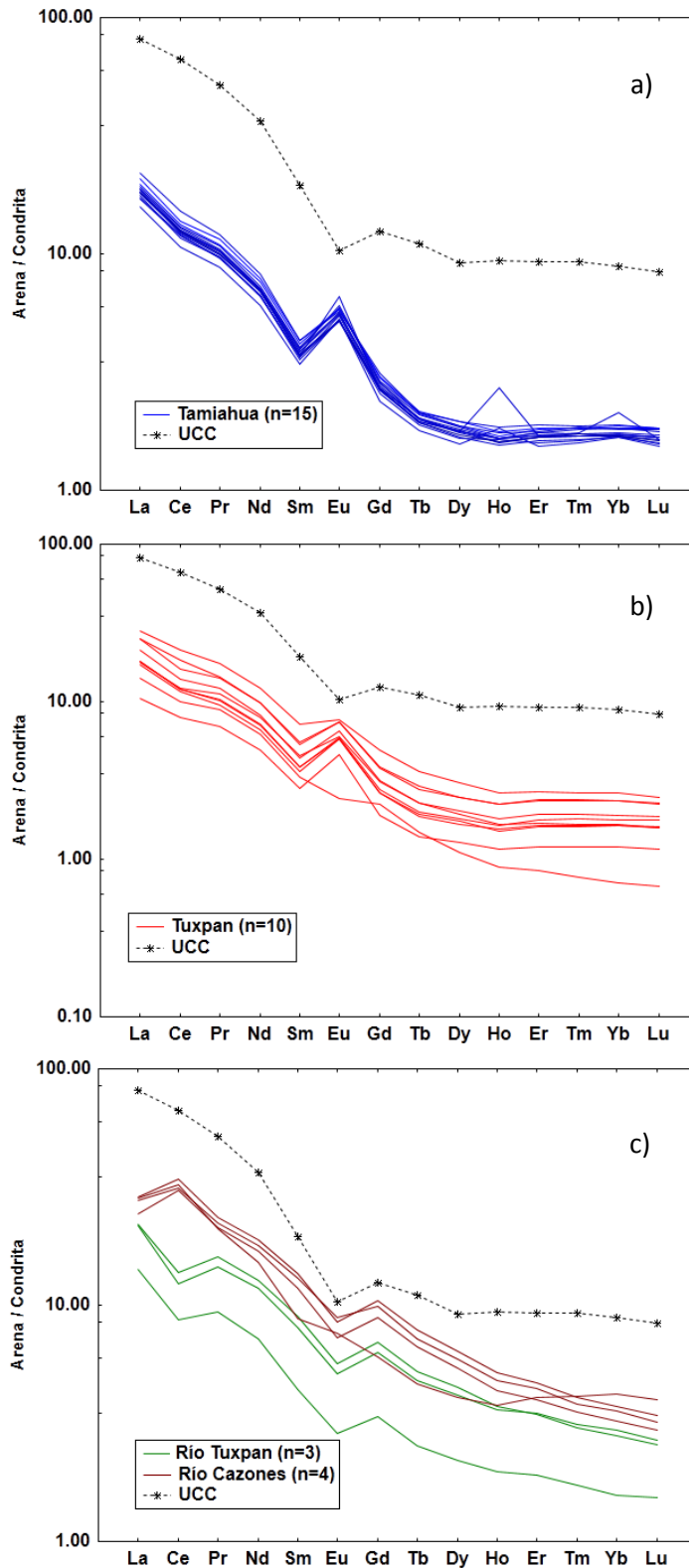


Figura 25. Diagramas spider para las arenas de playa y río obtenidos con la normalización con valores condriticos y comparados con el promedio de la corteza continental superior (Taylor y McLennan, 1985) a) Tamiahua b) Tuxpan c) ríos Tuxpan y Cazones.

Todas las muestras de arena de Tamiahua muestran un patrón similar de tierras raras (Fig. 25a) que indica que probablemente tienen la misma fuente, presentan un enriquecimiento de tierras raras ligeras y empobrecimiento de tierras raras pesadas y una marcada anomalía positiva de Eu. Las muestras de arena de Tuxpan presentan patrones distintos de tierras raras (Fig. 25b), lo que parece indicar diferentes fuentes del sedimento, un enriquecimiento de tierras raras ligeras pero un mayor contenido de tierras raras pesadas que las arenas de Tamiahua, presentando mayoritariamente anomalías positivas de Eu. Las muestras de arena de los ríos presentan un patrón diferente, mostrando enriquecimiento de tierras raras ligeras pero muestran anomalías negativas de Eu. Las anomalías positivas de Eu se deben a la presencia de plagioclasas en las arenas; las variaciones de la anomalía positiva de Eu son altas en las arenas de Tuxpan (Eu/Eu^* de 1.30 a 2.01) y se identifica una muestra con anomalía negativa de Eu ($Eu/Eu^*=0.83$) mientras que las arenas de Tamiahua muestran en su totalidad anomalías positivas de Eu (Eu/Eu^* de 1.56 a 2.09). Los ríos Tuxpan y Cazones muestran anomalías negativas de Eu (Eu/Eu^* de 0.71 a 0.78) y solo se identifica una muestra con anomalía positiva ($Eu/Eu^*=1.05$). Las diferencias entre los patrones de TR de las arenas de playa y río indican que los ríos tienen nula influencia sobre el depósito de las arenas de playa.

La inexistencia de correlación entre Al_2O_3 vs ΣTR para las arenas de Tamiahua ($r=0.30$; $n=15$), Tuxpan (0.55 ; $n=10$) y los ríos Tuxpan y Cazones ($r=0.10$; $n=7$), lo cual sugiere que la distribución de tierras raras se encuentra parcialmente controlada por el tamaño de grano (Figura 26). Se ha reportado que arenas de grano fino contienen más Al_2O_3 (Córdoba-Saldaña, 2011), sin embargo las arenas de playa de este estudio presentan un coeficiente de correlación negativa ($r=-0.46$; $n=25$) entre el Al_2O_3 y el tamaño promedio ($Mz\phi$) del sedimento (Figura 27). Esto se ve reflejado en el empobrecimiento del ΣTR en las arenas de Tamiahua (25-28 ppm) y Tuxpan (19-41 ppm).

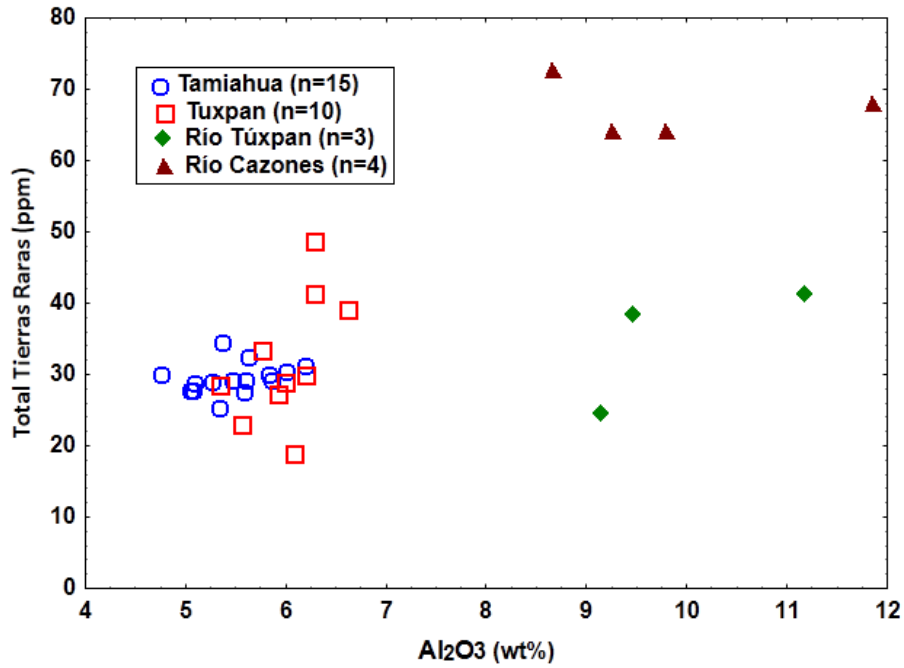


Figura 26. Diagrama ΣTR contra Al_2O_3 indicando las diferencias en las concentraciones de tierras raras de las arenas de playas de Tamiahua y Tuxpan y las de arena de los ríos Tuxpan y Cazones.

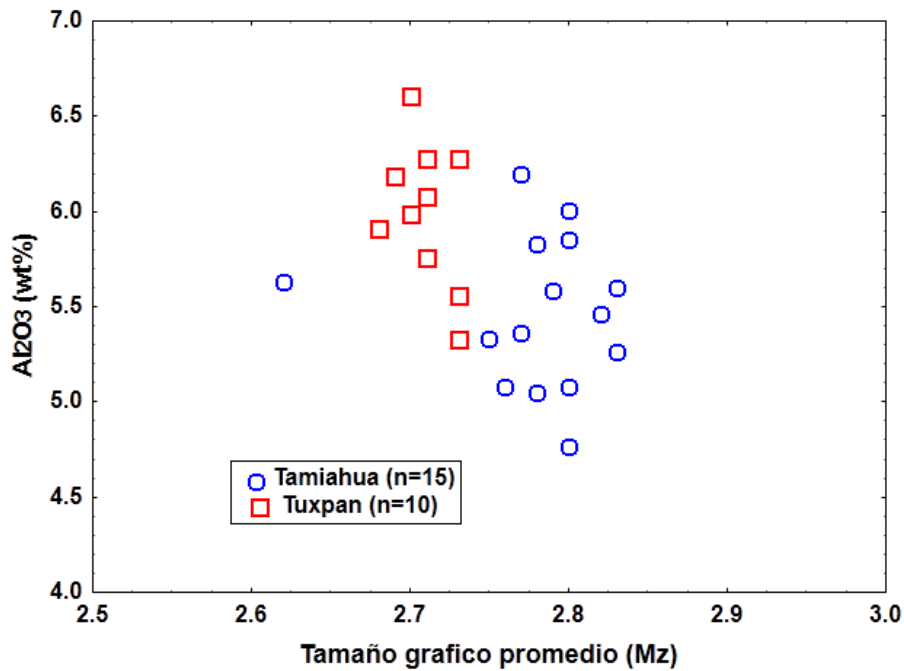


Figura 27. Diagrama Al_2O_3 contra tamaño grafico promedio ($Mz\phi$).

Una buena correlación positiva entre Zr y Σ TR (Figura 28) en las arenas de Tamiahua ($r=0.83$; $n=15$) y Tuxpan ($r=0.6$; $n=10$), sugiere que el zircón puede controlar parcialmente la distribución de ciertas tierras raras.

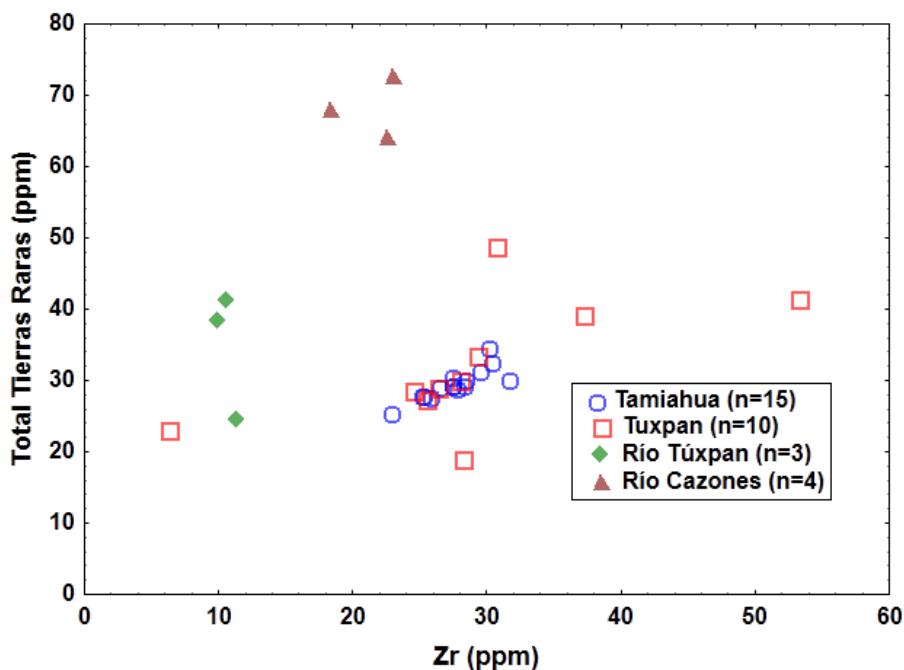


Figura 28. Diagrama binario Σ TR contra Zr para las arenas del presente estudio.

4.3.4 Condiciones de intemperismo químico

El grado de alteración y transformación de los feldespatos a arcillas indica el grado de intemperismo de la roca fuente así como la diagénesis experimentada por los sedimentos durante su depósito (Nesbitt *et al.*, 2006; Selvaraj y Chen, 2006). Diversos índices de intemperismo químico han sido desarrollados y se han utilizado ampliamente (e.g., Price y Velbel, 2003; Armstrong-Altrin *et al.*, 2004; Borges y Huh, 2007; Varga *et al.*, 2007; Nagarajan *et al.*, 2007a, 2007b; Pe-Piper *et al.*, 2008; Viers *et al.*, 2008; Lee, 2009; Etemad-Saed *et al.*, 2011) para identificar la intensidad del intemperismo químico en el área fuente del sedimento. Algunos ejemplos de estos índices son: el índice de intemperismo de Parker (WIP; Parker, 1970); índice de intemperismo químico (CIW; Harnois, 1988), índice de alteración química (CIA; Nesbitt y Young, 1982) y el índice de alteración de las plagioclasas (PIA; Fedo *et al.*; 1995). Entre estos el índice de alteración química (CIA=

$[Al_2O_3/Al_2O_3 + Na_2O + CaO^* + K_2O] \times 100$) (Nesbitt y Young, 1982) y el índice de intemperismo químico ($CIW = [Al_2O_3/Al_2O_3 + Na_2O + CaO^*] \times 100$) (Harnois, 1988) son los más ampliamente utilizados.

Los valores promedio de CIA son bajos para las arenas de Tamiahua (52.48 ± 1.07) y son similares a las de las arenas de Tuxpan (50.57 ± 1.78), sin embargo los ríos presentan valores de intemperismo más bajos con valores de (49.94 ± 6.56) para las arenas del río Tuxpan y de (46.34 ± 8.02) para las arenas del río Cazones. Estos valores indican una baja intensidad de intemperismo en el área fuente así como en los ambientes de río y playa.

4.4 PROCEDENCIA

Los diagramas de funciones discriminantes propuestos por Roser y Korsh (1988) sirven para identificar la procedencia de los sedimentos. El diagrama de función discriminante que utiliza elementos mayores permite separar la procedencia sedimentaria en cuatro grupos principales: ígneas máficas, intermedias y félsicas así como sedimentaria (Roser y Korsh, 1988).

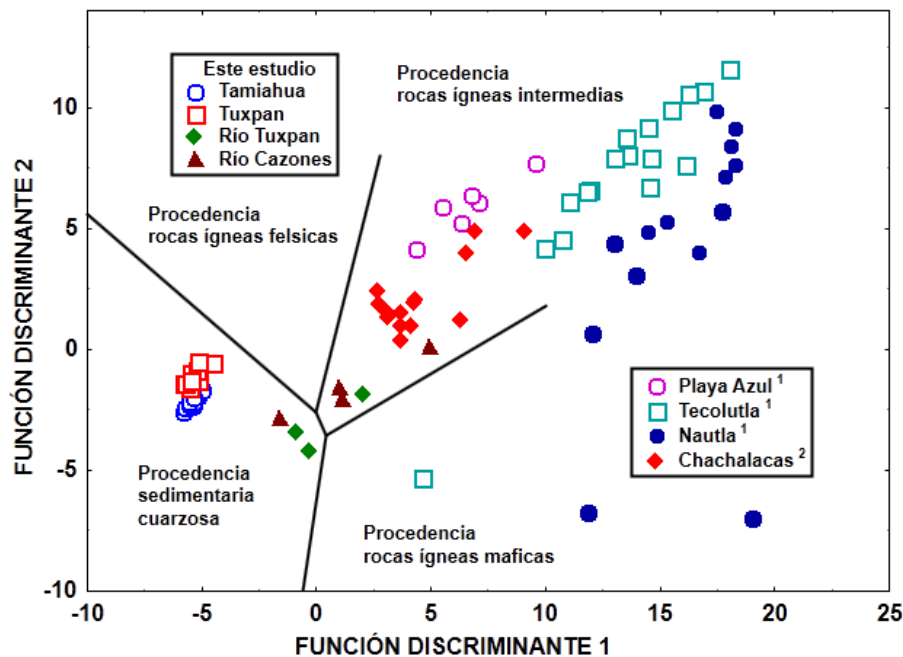


Figura 29. Diagrama de función discriminante para procedencia de sedimentos usando elementos mayores (Roser y Korsh, 1988). Las funciones discriminantes son: Función discriminante 1= $(-1.773 TiO_2) + (0.607 Al_2O_3) + (0.760 Fe_2O_3) + (-1.500 MgO) + (0.616 CaO) + (0.509 Na_2O) + (-1.224 K_2O) + (-9.090)$. Función discriminante 2= $(0.445 TiO_2) + (0.070 Al_2O_3) + (-0.250 Fe_2O_3) + (-1.142 MgO) + (0.438 CaO) + (1.475 Na_2O) + (-1.426 K_2O) + (-6.681)$. ¹ Armstrong-Altrin et al. (2012); ² Ramírez-Munóz (2012).

En este diagrama de discriminación (Figura 29) se aprecia la procedencia sedimentaria de las arenas de Tuxpan y Tamiahua. Esto se debe a que estas arenas son producto del reciclado de rocas detríticas y depósitos litorales antiguos (cordones litorales), próximos a estas playas; en el caso de las arenas de río Tuxpan son preferentemente de procedencia sedimentaria, mientras que las arenas del río Cazones son de procedencia ígnea intermedia. Como comparación se anexan datos de otras playas estudiadas como Nautla, Playa Azul y Tecolutla (Armstrong-Altrin *et al.*, 2012) así como playa Chachalacas (Ramírez Muñoz, 2012), que tienen en su mayor parte una procedencia ígnea intermedia debido a que los ríos descargan sedimentos procedentes de la Faja Volcánica Trans-Mexicana, mientras que la playa de Nautla tiene una procedencia ígnea máfica debido a que el río Nautla drena atravesando rocas máficas desde su origen en el Pico de Orizaba.

Taylor y McLennan (1985) sostienen que el factor determinante en la composición de los sedimentos es la roca fuente. Sin embargo, procesos secundarios (intemperismo, transporte, procesos diagenéticos, etc.) pueden tener alterar la composición química (Cullers *et al.*, 1987; Wronkiewicz y Condie, 1987) y debido a esto, es recomendable utilizar elementos que presenten baja movilidad bajo ciertas condiciones geológicas, tener bajos coeficientes de partición en aguas naturales y tiempos de residencia en la corteza y océano cortos (Taylor y McLennan, 1985).

Las tierras raras, el Th y Sc son útiles para inferir sedimentos procedentes de la corteza, debido a que no son afectados significativamente por procesos secundarios como la diagénesis y metamorfismo, y son menos afectados por el fraccionamiento de minerales pesados que otros elementos como el Zr, Hf y Sn (Bhatia y Crook, 1986; McLennan, 2001).

La abundancia de tierras raras y Th son mayores en rocas ígneas félsicas que en rocas ígneas máficas y a su vez en sus productos de intemperismo. Mientras que Co, Sc, V, Ni y Cr se encuentran más concentrados en rocas máficas que en félsicas y en sus productos de intemperismo. Se cree que estos elementos son transportados exclusivamente en el componente terrígeno de los sedimentos y por tanto puede reflejar

la química de la roca fuente (McLennan *et al.*, 1980; Kasper-Zubillaga *et al.*, 2008; Veizer, 1978).

Diversos estudios han utilizado las concentraciones de Cr y Ni para inferir la procedencia ultramáfica de los sedimentos. Además el enriquecimiento inusual de Ni sin acompañamiento de otros elementos traza ferromagnerianos (e.g. Cr) fue observado por Armstrong-Altrin *et al* (2004). Garver *et al* (1996) sugirieron que las altas concentraciones de Cr (>150 ppm) y Ni (>100 ppm), con un coeficiente de correlación elevado entre Cr y Ni y una proporción Cr/Ni de aproximadamente 1.4 son indicativos de una fuente ultramáfica.

Es este estudio, los contenidos de Cr son sumamente bajos en las arenas de Tamiahua (5 ± 1) y Tuxpan (5 ± 1), mientras que las arenas río tienen concentraciones más altas de este elemento, las del río Tuxpan (17 ± 4) y las del río Czones (32 ± 7). De manera similar las arenas de Tamiahua son pobres en Ni (1.6 ± 0.3) así como las de Tuxpan (2.3 ± 0.9), mientras que el río Tuxpan (18 ± 5) y el río Czones (19 ± 4) tienen concentraciones más altas. El coeficiente Cr/Ni para las arenas de Tamiahua es de 3.2, además de una buena correlación positiva entre Cr con Ni ($r=0.89$, $n=159$), y para las arenas de Tuxpan el coeficiente de correlación es de 2.2, y una buena correlación positiva Cr/Ni (0.93 , $n=10$), que implica que estos elementos tanto en Tuxpan como Tamiahua pudieron ser aportados desde rocas similares pero con características félsicas. Sin embargo las arenas de los ríos Tuxpan y Czones presentan un coeficiente Cr/Ni de 1.4 y una correlación positiva ($r=0.17$, $n=7$), que indica características más máficas de la roca fuente.

Del mismo modo, las concentraciones de V y Sc (Tabla 5) pueden ser usadas para inferir la roca fuente. McLennan (1991) indica que la concentración de V en sedimentos es de aproximadamente 20 ppm. En este estudio, las arenas de Tamiahua muestran bajas concentraciones de V (9.7 ± 0.6) y Sc (2.9 ± 0.2), estos valores ponen de manifiesto la naturaleza félsica de la roca fuente. Las arenas de Tuxpan muestran concentraciones similares de V (10.8 ± 1.7), pero valores mas altos de Sc (7.9 ± 4.6); sin embargo los altos valores de Sc en Tuxpan se deben a la mayor cantidad de minerales pesados y líticos

volcánicos máficos presentes en la arena (ver Tabla 5). En cambio los ríos muestran otro comportamiento geoquímico, donde el río Tuxpan muestra concentraciones elevadas de V (72 ± 14) y Sc (4.2 ± 0.8), así mismo el río Cazones también presenta altas concentraciones de V (95 ± 13) y Sc (7.6 ± 0.9), lo que evidencia que las arena de los ríos Tupan y Cazones tienen mas influencia de rocas máficas.

Los diagramas binarios y ternarios (Th/Sc vs. Sc y La-Th-Sc) otorgan información relevante acerca de las características de la roca fuente (McLennan y Taylor, 1991; Cullers, 2002). La relación Th/Sc vs. Sc y las concentraciones de Sc, La y Th (diagrama ternario) son mostradas en las figuras 30 y 31 respectivamente, para conocer la posible roca fuente del sedimento.

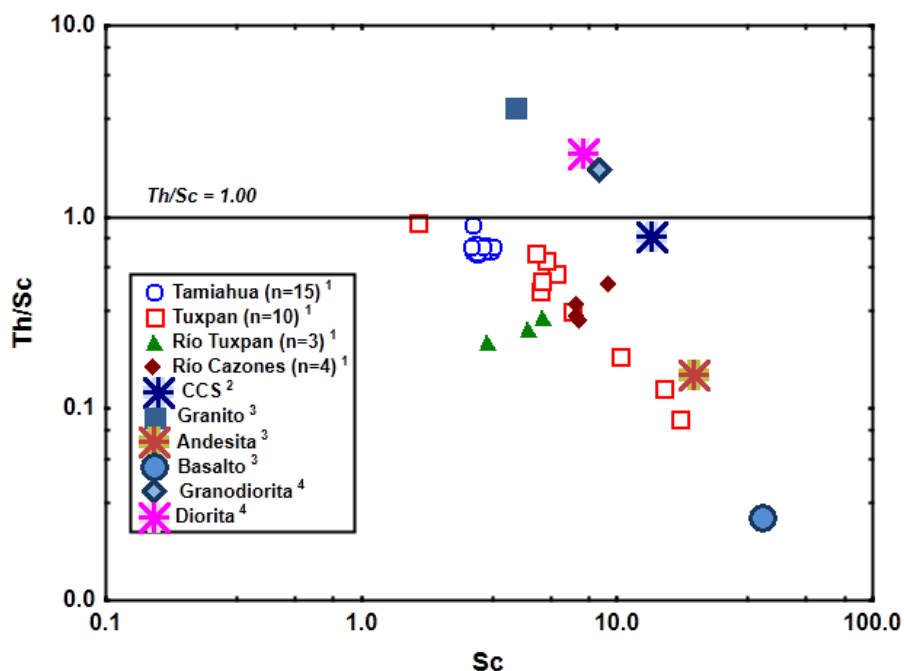


Figura 30. Diagrama binario Th/Sc vs. Sc para muestras de arena. ¹ este estudio, ² corteza continental superior (CCS, McLennan, 2001); ³ granito, andesita y basalto (Condie, 1993); ⁴diorita y granodiorita (Wang et al., 2003).

En los diagramas se observa que todas las muestras de Tamiahua tienen similitud con las composiciones de rocas félsicas, mientras que las muestras de Tuxpan se asemejan a las composiciones de rocas intermedias y máficas. Las muestras tanto del río Tuxpan como del Cazones se acercan a la composición de las andesitas (composición intermedia).

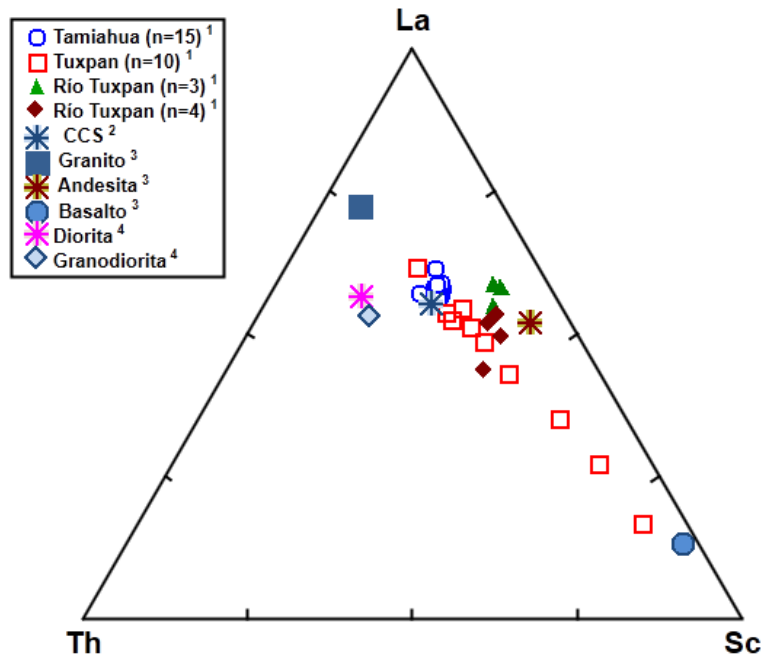


Figura 31. Diagrama ternario La-Th-Sc para muestras de arena. ¹ este estudio, ² corteza continental superior (CCS, McLennan, 2001); ³ granito, andesita y basalto (Condie, 1993); ⁴ diorita y granodiorita (Wang et al., 2003).

Los patrones relativos de tierras raras así como el tamaño de la anomalía de Eu (positivo o negativo) han sido usados para inferir la roca fuente de los sedimentos (Cullers y Graf, 1984; Taylor y McLennan, 1985; Wronkiewicz y Condie; 1989; Cullers, 1994a; 2000). En este estudio, el cociente entre TR Ligeras/TR Pesadas es similar para las arenas de Tuxpan (9.41 ± 0.29) y Tuxpan (9.49 ± 0.98) pero mas bajos para las arenas del río Tuxpan (5.71 ± 0.61) y río Cazones (7.53 ± 0.8). De manera similar, las arenas de Tamiahua presentan anomalías positivas de europio ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 1.72$; Figura 25 a, b, c) así como las arenas de Tuxpan ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 1.63$); mientras que las arenas del río Tuxpan ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.73$) y del río Cazones ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.81$) presentan anomalías negativas de europio. Los valores similares entre las arenas de Tamiahua y Tuxpan sugieren que tienen la misma roca fuente pero esta es distinta para las arenas de los ríos Tuxpan y Cazones.

4.4.1 Probable roca fuente

Con la finalidad de identificar la procedencia de las arenas de playa en estudio, fueron localizadas bases de datos de tierras raras en rocas relativamente cerca del área de

estudio así como de otros estudios geoquímicos llevados a cabo en otras partes del mundo, las cuales fueron comparadas con datos obtenidos en la presente investigación (ver Figura 35 para localización y Figura 36 para tipos de rocas).

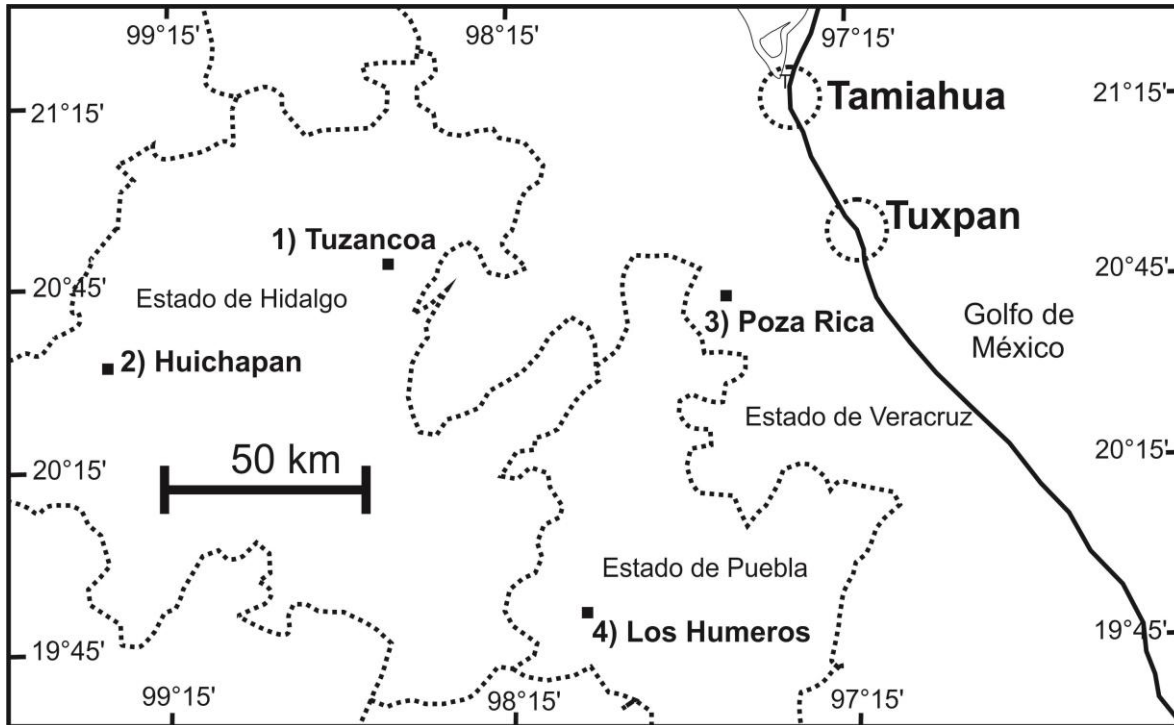


Figura 32. Áreas de estudio y localidades donde se compiló la base de datos geoquímica para comparar e identificar la procedencia de arenas de Tamiahua y Tuxpan. La fuente de datos para la procedencia son: 1) Rosales-Lagarde et al. (2005); 2) Verma (2001a); 3) Orozco-Esquivel et al. (2003); 4) Verma (2001b).

Los datos geoquímicos de las posibles rocas fuente fueron compiladas de manera separada debido a que se supone que reciben sedimentos de diversos orígenes. Los patrones de tierras raras normalizados con condrita para las arenas de Tamiahua, Tuxpan así como los ríos Tuxpan y Czones, junto con la roca fuente son mostrados en la Figura 36.

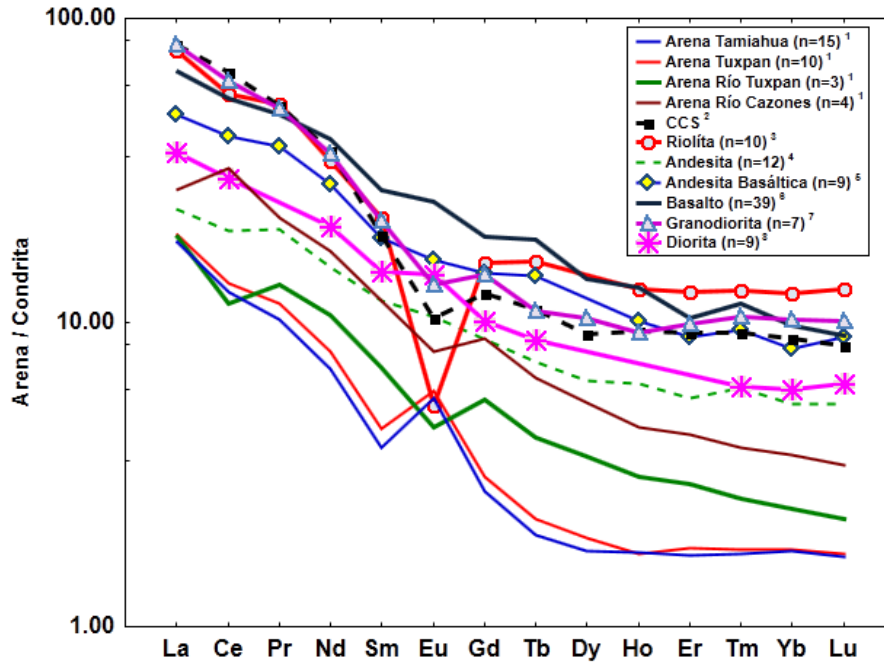


Figura 33. Patrones de tierras raras normalizados con condrita para las arenas de Tamiahua, Tuxpan, río Tuxpan y río Cazones; n=número de muestras; ² CCS (Promedio de la corteza continental; Taylor y McLennan, 1985; ³ Rosales-Lagarde et al. (2005); ³ Verma (2000; 2001a, 2001b); ⁴ Verma (2001a, 2001b); ⁵ Verma (2000; 2001a, 2001b); ⁶ Orozco-Esquivel et al. (2003); Wang et al., (2003); ⁸ Bogaerts et al., (2003).

En la Figura 33, los patrones de tierras raras para las arenas de Tamiahua y Tuxpan muestran un empobrecimiento en estos elementos por efecto de dilución del cuarzo (Cullers, 1988; 2000), además de anomalía positiva de Eu, debido a la gran cantidad de plagioclasas en el sedimento (ver Petrografía). Las arenas de Tamiahua y Tuxpan probablemente fueron derivadas de rocas plutónicas intermedias (granodiorita y diorita) que debido a que los patrones de tierras raras son similares a los de estas rocas; y esto se encuentra sustentado también en que tanto la clasificación geoquímica (Figura 18) y petrográfica (Figura 10), indican que las arenas son subarcosas, y que posiblemente se formaron por la denudación del basamento cristalino (granodioritas, dioritas y gabros) de la porción norte del estado de Veracruz (SGM, 2004a; 2004b, 2004c; 2007). Mientras que para las arenas de los ríos Tuxpan y Cazones los patrones de tierras raras como el tamaño de la anomalía de Eu sugiere que la roca fuente son posiblemente rocas intermedias volcánicas (andesitas).

CONCLUSIONES

Distribución granulométrica

El análisis granulométrico de las arenas de Tamiahua indica que son arenas finas muy bien clasificadas. En Tuxpan se presentan arenas finas muy bien clasificadas. Las arenas de los ríos Tuxpan van de gravas finas a arenas gruesas de mal clasificadas a moderadamente bien clasificadas. El río Cazones presenta arenas gruesas a medias de mal clasificadas a moderadamente clasificadas.

Los diagramas binarios de discriminación de ambientes sedimentarios $\sigma_1\phi$ vs Sk_I propuesto por Friedman (1967) y el Sk_I vs $\sigma_1\phi$ planteado por Friedman (1967) así como Moiola y Weiser (1968); indican que las arenas de Tamiahua y Tuxpan caen dentro del ambiente de playa, mientras que las muestras de arena de los Ríos Tuxpan y Cazones dentro del ambiente de río. La muy buena clasificación de las arenas y los tamaños predominantes (arenas finas) concuerda con el ambiente sedimentario de playa, mientras que los sedimentos de río se encuentran compuestos de tamaños de partícula heterogéneos, como gravas, arenas y lodos en distintas proporciones, que asimismo son generalmente mal clasificados.

El diagrama $Mz\phi$ vs $\sigma_1\phi$ propuesto por Friedman (1961) y el diagrama $Mz\phi$ vs Sk_I propuesto por Moiola y Weiser (1968), así como Hails y Hoyt (1969) es utilizado para discriminar entre los ambientes sedimentarios litorales de playa y duna. En el primero la totalidad de las arenas de las dos playas caen dentro del ambiente de duna, mientras que en el segundo la mayoría de las muestras de Tamiahua caen dentro del ambiente de Duna. Las muestras de Tuxpan caen en los dos ambientes. Esto refleja que en las playas de Tuxpan existe una interacción importante entre los procesos del oleaje en la playa y la acción eólica que transporta granos finos hacia la misma. Mientras que en Tamiahua existe una predominancia de la acción eólica en la sedimentación y esto concuerda con los tamaños más finos encontrados en esta zona

Análisis Geoquímico

El análisis geoquímico de elementos mayores indicó que los contenidos de SiO_2 en las arenas de Tamiahua son altos, y varían de 89 a 92 %. Los contenidos para de SiO_2 para las arenas de Tuxpan fueron altos y van de 88 a 90 %, indicando una composición félsica. Las variaciones en los contenidos de SiO_2 para las arenas del río Tuxpan mostraron valores altos (72 – 78 %), mientras que las arenas del río Cazones mostraron valores que van de intermedios a altos (60 – 79 %), indicando que la composición varía de intermedia a félsica.

La variación en la relación Al_2O_3/TiO_2 es mas amplia en las arenas de Tuxpan (82 -72), que en las arenas de Tamiahua (38 -59). Estas diferencias observadas en la relación Al_2O_3/TiO_2 entre las arenas de Tamiahua y Tuxpan puede deberse a las diferencias en contenido de minerales pesados entre las dos playas.

Los contenidos de aluminio de Al_2O_3 son relativamente más bajos en las arenas de Tamiahua (5 – 6 %) que en las de Tuxpan (5 – 7 %), mientras que se incrementa para las arenas del río Tuxpan (9 – 11%) y río Cazones (9 – 12 %), observándose que los contenidos de Al_2O_3 se incrementan cuando el tamaño de la arena aumenta.

El valor del coeficiente de correlación obtenido para TiO_2 contra Al_2O_3 es pequeño en las arenas de Tamiahua y negativo ($r=-0.23$, $n=15$) que en las arenas de Tuxpan ($r=0.68$, $n=10$), mientras que es alto para las arenas del río Tuxpan ($r=0.93$, $n=3$) y Cazones ($r=0.88$, $n=4$). Esto indica la ausencia de minerales pesados para las arenas de Tamiahua pero abundantes para las arenas de Tuxpan y de los ríos Tuxpan y Cazones.

Geoquímicamente las arenas de Tamiahua y Tuxpan son clasificadas como tipo sub-arcosa y las arenas de los ríos Tuxpan y Cazones clasificadas como tipo litoarenita.

En comparación con los valores de la corteza continental superior las muestras estudiadas de Tamiahua y Tuxpan tienen concentraciones altas de Rb, Ba y Ta, y el Sc se encuentra enriquecido solo para Tuxpan, y a su vez muestran concentraciones bajas de Th y U. A su vez, existe una muy buena correlación de Rb/K ($r=0.84$, $n=32$) y Ba/K ($r=0.82$, $n=32$) en el

total de las muestras estudiadas, debido a que la geoquímica de estos elementos traza se encuentra controlada por la presencia de feldespatos en las arenas de playa. Las muestras de los ríos Tuxpan y Cazones muestran concentraciones altas de V, Ni y Sr y concentraciones menores del resto de los elementos Traza, ya que las arenas de los ríos tienen mayores concentraciones de minerales pesados..

El contenido del Σ TR es más alto en las arenas del río Cazones (64 – 72) que en las muestras de arena de Tamiahua (25 – 32), Tuxpan (27 – 41) y río Tuxpan (24 – 41), probablemente debido al tipo de roca fuente.

En las muestras de arena de Tamiahua y Tuxpan se observan patrones similares de tierras raras con un mayor contenido de tierras raras ligeras y empobrecimiento de tierras raras pesadas y una anomalía positiva de Eu. Mientras que para las muestras del río Tuxpan y Cazones presentan anomalía negativa de Eu. Las variaciones en la anomalía positiva de Eu son mayores en la arena de Tamiahua (Eu/Eu* de 1.56 a 2.09) que en las arenas de Tuxpan (Eu/Eu* de 1.30 a 2.01), mientras que para las muestras del río Tuxpan y Cazones el tamaño de la anomalía negativa de Eu se encuentra en valores de Eu/Eu* de 0.71 a 0.78. El mayor contenido de tierras raras en las arenas del río Cazones (64 – 72) puede ser debido a la adición de minerales accesorios o pesados durante su transporte.

La inexistente correlación entre Al_2O_3 y Σ TR observados en Tamiahua ($r=0.30$, $n=15$) y Tuxpan ($r=0.55$, $n=10$), sugieren que la distribución de tierras raras está parcialmente controlada por el tamaño de grano, según el desgaste sufrido durante el transporte y las condiciones de energía en el ambiente de depósito. El mismo comportamiento se observa para las arenas de los ríos Tuxpan y Cazones.

La correlación positiva entre Zr y Σ TR en las arenas de Tamiahua ($r=0.83$, $n=15$) y Tuxpan ($r=0.6$, $n=10$) sugiere que el zircón puede controlar parcialmente la distribución de las tierras raras.

El diagrama de función discriminante propuesto por Roser y Korsh (1988) revela que las arenas de Tamiahua y Tuxpan tienen una procedencia sedimentaria. Mientras que las

arenas del río Tuxpan y Cazonos son probablemente derivadas de rocas ígneas intermedias.

En promedio los valores del índice de intemperismo químico (CIW) son ligeramente menores en Tuxpan (50.57 ± 1.78) que en las arenas de Tamiahua (52.48 ± 1.07), mientras que las arenas del río Tuxpan (46.34 ± 8.02) y río Cazonos (49.94 ± 6.56) presentan valores más bajos. Estos valores en el CIW indican una baja intensidad de intemperismo en el área fuente y dentro del ambiente de río y playa.

Los bajos contenidos de Sc, V, Cr y Ni en las arenas de Tamiahua y Tuxpan indican que no existen minerales ferromagnesianos (olivino y piroxeno) que contengan estos elementos. Mientras que en las arenas del río Tuxpan y Cazonos indican un carácter intermedio. Esto también es identificado por el diagrama binario Th/Sc vs Sc y el diagrama ternario La-Th-Sc.

Las arenas de Tamiahua y Tuxpan tienen anomalías positivas de Eu ($Eu/Eu^*=1.72$) y ($Eu/Eu^*=1.63$) respectivamente, esto indica que posiblemente tienen el mismo tipo de roca fuente. Las arenas del río Tuxpan y Cazonos tienen anomalías negativas ($Eu/Eu^*=0.73$) y ($Eu/Eu^*=0.81$), respectivamente. Estas variaciones indican las diferencias en el tipo de roca fuente entre las arenas de playa y río.

En la los patrones de tierras raras para las arenas de Tamiahua y Tuxpan muestran un empobrecimiento en estos elementos por efecto de dilución del cuarzo, además de anomalía positiva de Eu, debido a la gran cantidad de plagioclasas en el sedimento. Las arenas de Tamiahua y Tuxpan probablemente fueron derivadas de rocas plutónicas intermedias (granodiorita y diorita) que debido a que los patrones de tierras raras son parecidos a los de estas rocas; que se formaron por la denudación del basamento cristalino (granodioritas, dioritas y gabros) de la porción norte del estado de Veracruz. Mientras que para las arenas de río tanto del río Tuxpan como cazonos los patrones de tierras raras como el tamaño de la anomalía de Eu sugiere que la roca fuente son posiblemente rocas intermedias volcánicas (andesitas).

Análisis Petrográfico

El análisis petrográfico mostró que el cuarzo es sumamente abundante en las arenas de Tamiahua (71 – 75 %) y Tuxpan (67 – 68 %), mientras que su contenido disminuye drásticamente para las arenas de los ríos Tuxpan y Cazones (17 – 30 %). Las plagioclasas son abundantes en las arenas de Tamiahua (14 – 20 %) y Tuxpan (11 %). Para los fragmentos líticos, en las arenas de Tamiahua predominan los líticos sedimentarios (4 – 6 %), al igual que en las arenas de Tuxpan (7-10%), sin embargo en las arenas del río Tuxpan alcanza hasta un 61% de líticos sedimentarios, mientras que en las arenas del río Cazones predominan los líticos volcánicos (44-54%). Además se observó que los minerales pesados son más abundantes en las arenas del río Cazones (8 – 14 %) y río Tuxpan (11 %), y son escasos para las arenas de Tuxpan y Tamiahua (1 – 4 %).

El diagrama ternario Ct-Ft-Lt propuesto por Folk (1989) muestra que las arenas de Tamiahua y Tuxpan son sub-arcosas, mientras que las arenas de los ríos Tuxpan y Cazones son litoarenitas.

REFERENCIAS

- Armstrong-Altrin, J.S. (2009) Provenance of sands from Cazones, Acapulco and Bahía Kino beaches, México, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v.26(3), pp. 764-782.
- Armstrong-Altrin, J.S., y Verma, S.P. (2005) Critical evaluation of six tectonic setting discrimination diagrams using geochemical data of Neogene sediments from known tectonic setting, *Sedimentary Geology*, v. 177 (1-2), pp. 115-129.
- Armstrong-Altrin, J.S., Lee, Y.I., Verma, S.P. y Ramasamy, S. (2004) Geochemistry of sandstones from upper Miocene Kudankulam Formation, southern India: Implications for provenance, weathering, and tectonic setting, *Journal of Sedimentary Research*, v. 74, pp. 285-297.
- Armstrong-Altrin, J.S., Madhavaraju, J., Ramasamy, S., y Gladwin Gnana Asir, N. (2005) Provenance and depositional history of sandstones from the Upper Miocene Kudankulam Formation, Tamil Nadu: *Journal of the Geological Society of India*, v. 66, pp. 59-65.
- Armstrong-Altrin, J.S., Lee, Y.I., Kasper-Zubillaga, J.J., Carranza-Edwards, A., García, D., Nelson-Evy, G., Balam, V. y Cruz-Ortíz, N.L. (2012) Geochemistry of Beach Sands along the western Gulf of México, México, Implication of provenance, *Chemie Der Erde*, Artículo (en Prensa).
- Armstrong-Altrin, J.S., Nagarajan, R., Madhavaraju, J., Rosalez-Hoz, L., Lee, Y.I., Balam, V., Cruz-Martinez, A. y Avila-Ramirez, G. (2013) Geochemistry of the Jurassic and upper Cretaceous shales from the Molango Region, Hidalgo, Eastern Mexico: Implications of source-area weathering, provenance, and tectonic setting. *Comptes Rendus Geoscience (En prensa)*.
- Banfield, J.F. y Eggleton, R.A. (1989) Apatite replacement and rare earth mobilization, fractionation, and fixation during weathering, *Clays and Clay Mineralogy*, v. 37, pp. 113-127.
- Baker, H.W. (1976) Environmental sensitivity of submicroscopic surface textures on sand grains - a statistical evaluation: *Journal of Sedimentary Petrology*, v. 46, pp. 971-880.

- Barber, C. (1976) Major and trace element associations in limestones and dolomites, *Chemical Geology*, v. 14, pp. 273-280.
- Barker, R.W., y Blow, W.H. (1975) Biostratigraphy of the some Tertiary formations in the Tampico-Misantla Embayment, Mexico, *Journal of Foraminiferal Research*, v. 6 (1), pp. 39-58.
- Basu, A. (1985) Influence of climate relief on composition of sands released at source areas. In: Zuffa, G.G. (Ed.), *Provenance of Arenites*, Dordrecht Reidel Publishing, Dordrecht, pp. 1-18.
- Bakkiaraj, D., Nagendra, R., Nagarajan, R. y Armstrong-Altrin, J.S. (2010) Geochemistry of sandstones from the Upper Cretaceous Sillakkudi Formation, Cauvery Basin, Southern India: Implication for provenance, *Journal of the Geological Society of India*, v. 76, pp. 453-467.
- Belt, B.C. (1925) Stratigraphy of the Tampico District of Mexico, *Bulletin of American Association of Petroleum Geologists*, v. 9 (1), pp. 136-144.
- Bhatia, M.R. (1983) Plate tectonics and geochemical composition of sandstones, *Journal of Geology*, v. 91., pp. 611-627.
- Bhatia, M.R. y Crook, K.A.W. (1986) Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v.92, pp. 181-193.
- Blatt, H., Middleton, G.V., y Murray, R.C. (1980) *Origin of Sedimentary Rocks*, 2nd edition, Prentice Hall, New Jersey, 634 p.
- Bogaerts, M., Scaillet, B., Liégeois, J.P. y Auwera, J.V. (2003) Petrology and geochemistry of the Lyngdal granodiorite (Southern Norway) and the role of fractional crystallisation in the genesis of Proterozoic ferro-potassic A-type granites, *Precambrian Research*, v. 124, pp. 149-184.
- Borges, J.B., y Huh, Y. (2007) Petrography and chemistry of the bed sediments of the Red River in China and Vietnam: provenance and chemical weathering, *Sedimentary Geology*, v. 194 (3-4), pp. 155-168.

- Borges, J.B., Huh, Y., Moon, S. y Noh, H. (2008) Provenance and weathering control on river bed sediments of the eastern Tibetan Plateau and the Russian Far East, *Chemical Geology*, v. 254 (1-2), pp. 52-72.
- Brown, J.E. (1973) Depositional histories of sand grain textures: *Nature*, v. 242, pp. 396-398.
- Bull, P.A. (1981) Environmental reconstruction by electron microscopy: *Progress in Physical Geography*, v. 5, pp. 368-397.
- Carranza-Edwards, A. (1975) Unidades morfo-tectónicas continentales de las costas mexicanas. *Anales del Centro de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM*, v. 2(1), pp. 81-88.
- Carranza-Edwards, A. (2001) Grain size and sorting in modern beach sands, *Journal of Coastal Research*, V. 17(1), pp. 38-52.
- Carranza-Edwards A. y Rosales-Hoz, L. (1988) Estudio de metales en arenas de playa de San Antonio del Mar, Baja California, México, *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Autónoma de México*, v. 15(1), pp. 215-222.
- Carranza-Edwards, A., y Rosales-Hoz, L. (1995) Grain-size trends and provenance of Southwestern Gulf of Mexico beach sands, *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 32, pp. 2009-2014.
- Carranza-Edwards, A., Rosales-Hoz, L. y Santiago-Pérez, S. (1994) Provenance memories and maturity of Holocene sands in northwest Mexico, *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 31. pp. 1550-1556.
- Carranza-Edwards, A., Rosales-Hoz, L. y Santiago-Pérez, S. (1996) A reconnaissance study of carbonates in Mexican beach sands, *Sedimentary Geology*, v. 101, pp 261-268.
- Carranza-Edwards, A., Bocanegra-García, G., Rosalez-Hoz, L. y Galán, L.P. (1998) Beach sands from Baja California Peninsula, México, *Sedimentary Geology*, v. 119, pp. 263-274.

- Carranza-Edwards, A., Centeno-García, E., Rosales-Hoz, L. y Cruz, R.L.S. (2001) Provenance of beach gray sands from western México, *Journal of South American Earth Sciences*, v. 14, pp. 291-305.
- Carranza-Edwards, A., Rosales-Hoz, L., Urrutia-Fucugauchi, J., Sandoval-Fortadel, A. y Morales-De la Garza, E., Lozano-Santa Cruz, R. (2005) Geochemical distribution pattern of sediments in an active continental shelf in Southern Mexico, *Continental Shelf Research*, v. 25 (2005), pp.521-537.
- Carranza-Edwards, A., Kasper-Zubillaga, J.J., Rosales-Hoz,L., Morales-De la Garza, E. y Santa-Cruz, R.L. (2009) Beach sand composition and provenance in a sector of the southwestern Mexican Pacific, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 26(2), pp. 433-447.
- Carrillo, B.J. (1961) Geología del Anticlinorio Huizachal-Peregrina al NW de Cd. Victoria, Tamps., *Bulletin of American Association of Petroleum Geologists*, v. 8, 98 p.
- Carrillo, B.J. (1969) Resumen de la Exploración Geológica de la Plataforma Valles, S.L.P., Gerencia de Exploración de PEMEX, Instituto Mexicano del Petroleo, 146 p.
- Chandler, F.W. (1988) Quartz arenites: review and interpretation, *Sedimentary Geology*, v. 58, pp. 105-126.
- Condie, K.C. (1993) Chemical composition and evolution of upper continental crust: Contrasting results from surface samples and shales, *Chemical Geology*, v. 104, pp. 1-37.
- Córdoba-Saldaña, L.P. (2011) Análisis granulométrico y geoquímico de arenas recientes en tres playas de México (Tecolutla, Bahía Kino y San Carlos): implicación de procedencia, Tesis de maestría, Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología, UNAM.
- Cox,R., y Lowe, D.R. (1996) Quantification of the effects of secondary matrix on the analysis of sandstone composition, and a petrographic-chemical technique for retrieving original framework grain modes of altered sandstones, *Journal of Sedimentary Research*, v. 66, pp. 548-558.
- Crook, K.A.W (1968) Weathering and roundness of quartz sand grains, *Sedimentology*, v. 11, pp. 171-182.

- Crook, K.A.W. (1974) Lithogenesis and tectonics: the significance of compositional variations in flysch arenites greywackes. In: R.H. Dott and R.H. Shaver (Eds), Modern and ancient geosynclinal sedimentation, Society Economic Paleontologists and Mineralogists, Special Publication, v. 19, pp.304-310.
- Cullers, R.L. (1988) Mineralogical and chemical changes of soil and stream sediment formed by intense weathering of the Danburg Granite, Georgia, USA, *Lithos*, v.21, pp. 301-314.
- Cullers, R.L. (1994a) The chemical signature of source rocks in size fraction of Holocene stream sediment derived from metamorphic rocks in the Wet Mountains region, USA, *Chemical Geology*, v. 113, pp. 327-343.
- Cullers, R.L. (1994b) The controls on the major and trace element variation of shale, siltstones and sandstones of Pennsylvanian-Permian age from uplifted continental blocks in Colorado to platform sediment in Kansas, USA, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 58, pp. 4955-4972.
- Cullers, R.L. (2000), The geochemistry of shales, siltstones, and sandstones of Pennsylvanian-Permian age, Colorado, USA: implications of provenance and metamorphic studies, *Lithos*, v. 51, pp 181-203.
- Cullers, R.L. (2002) Implications of elemental concentrations for provenance, redox conditions, and metamorphic studies of shales and limestones near Pueblo, CO, USA, *Chemical Geology*, v. 191, pp. 305-327.
- Cullers, R.L., y Graf, J.L. (1984) Rare earth elements in igneous rocks of the continental crust: Intermediate and silicic rocks-ore petrogenesis. In: P. Henderson (Ed.), *Rare Earth Element Geochemistry*, Elsevier, Amsterdam, pp. 275-316.
- Cullers, R.L., Basu, A., Suttner y L.J. (1988) Geochemical signature of provenance in sand-size material in soils and stream sediments near the Tobacco Root batholith, Montana, USA, *Chemical Geology*, v. 70, pp. 335-348.
- Davies, J.L. (1964) A morphogenic approach to shorelines, *Zeitschrift fur Geomorphologie*, v. 8, pp. 127-142.
- Dickinson W.R., Beard, L.S., Brakenridge, G.R., Erjavec, J.L., Ferguson, R.C., Inman, K.F., Knepp, R.A., Lindberg, F.A., Rybeg, P.T., 1983, Provenance of Phanerozoic sandstones

- in relation to tectonic setting, Geological Society of America Bulletin, v. 94, pp. 222-235. J.C., y Krinsley, D.H. (1971) Electron microscopy applied to quartz grains from a tropical environment: Sedimentology, v. 17, pp. 89-101.
- Dott, Jr., R.H. (2003) The importance of eolian abrasion in supermature quartz sandstones and the paradox of weathering on vegetation-free landscapes, Journal of Geology, v. 111, pp. 387-405.
- Dumble, E.T. (1918) Geology of the Northern of the Tampico Embayment Area, v. 8, pp. 113-156.
- Etemad-Saeed, N., Hosseini-Barzi, M. y Armstrong-Altrin, J.S. (2011) Petrography and geochemistry of clastic sedimentary rocks as evidences for provenance of the Lower Cambrian Lalun Formation, Poshtebadam block, Central Iran, Journal of African Earth Sciences, v. 61, pp. 142-159.
- Fedo, C.M., Nesbitt, H.W. y Young, G.M. (1995) Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks an paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance, Geology, v. 23 (10), pp. 921-924.
- Ferree, R.A., Jordan, D.W., Kertes, R.S., Savage, K.M. y Potter P.E. (1988) Comparative petrographic maturity of river and beach sand, and origin of quartz arenites, Journal of Geological Education, v. 36, pp. 79-87.
- Folk, R.L. (1960) Petrography and origin of the Tuscarora, Rose Hill and Keefer Formations, Lower an Middle Silurian of western West Virginia, Journal of Sedimentary Petrology, v. 25, pp. 297-301.
- Folk, R.L. (1974) Petrology of Sedimentary Rocks: Austin, Texas, Hemphill Publishing Co, 182 p.
- Folk, R.L., y Ward, W.C. (1957) Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters, Journal of Sedimentary Petrology, v. 27, pp 3-26.
- Fernández-Eguiarte, A., Gallegos-García, A., y Zavala-Hidalgo, J. (1992a) Oceanografía Física 1 (Masas de agua y mareas de los mares mexicanos). Atlas Nacional de México, (Hoja IV.9.1, Verano), Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.

- Fernández-Eguiarte, A., Gallegos-García, A., y Zavala-Hidalgo, J. (1992b) Oceanografía Física 2 (Masas de agua y mareas de los mares mexicanos). Atlas Nacional de México, (Hoja IV.9.2, Invierno), Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Franzinelli, E. y Potter, P.E. (1983,) Petrology, chemistry, and textures of modern river sands, Amazon River System, *Journal of Geology*, v. 91, pp. 23-39.
- Gosen, W., Von, Buggish y W., Prozzi, C. (2009) Provenance and geotectonic setting of Late Proterozoic – Early Cambrian metasediments in the Sierras de Córdoba and Guasayán (western-argentina): geochemical approach. *Neues Jahrbuch fur Geologie und Palaontologie-Abhandlungen*, v. 251 (3), pp. 257-284.
- Harnois, L. (1988) The CIW Index: A new chemical index of weathering: *Sedimentary Geology*, v. 55 (3-4), pp. 319-322.
- Heim, A. (1940) The front ranges of the Sierra Madre Oriental Mexico, from C. Victoria to Tamazunchale, *Eclogae Geologicae Helvetiae*, v. 33, pp. 313 -362.
- Helland, P.E., y Diffendal Jr. R.F. (1993) Probable glacial climatic conditions in source areas during depositions of parts of the Ash Hollow Formations, Ogallala Group (Late Tertiary), of Western Nebraska: *American Journal of Science*, v. 293, pp. 744-757.
- Herron, M.M. (1988) Geochemical classifications of terrigenous sands and shales from core or log data, *Journal of Sedimentary Petrology*, v. 58, pp. 820-82.
- Honda, M.S., YabSauky, S., y Shimuizu, H. (2004) Geochemical and isotopic studies of Aeolian sediments in china, *Sedimentology*, v. 51, pp. 211-230.
- Ingersoll, R.V. (1978) Petrofacies and petrology evolution of the Late Cretaceous fore-arc basin northern and central California, *Journal of Geology*, pp. 335-352.
- Johnsson, M.J. (1988) First-cycle quartz arenites in the Orinoco River Basin, Venezuela and Colombia, *Journal of Geology*, v. 96, pp. 263-277.
- Johnsson, M.J., Stallard, R.F. y Lundberg, N. (1991) Controls on the composition of fluvial sand from a tropical weathering environment: Sands of the Orinoco River drainage

- river, Venezuela and Colombia, Geological Society of America Bulletin, v. 103, pp. 1622-1647.
- Kasper-Zubillaga, J.J. (2009) Roundness in quartz grains from inland and coastal dune sands, Altar Desert, Sonora, México: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, v. 61(1), pp. 1-12.
- Kasper-Zubillaga, J.J. y Dickinson, W.W. (2001) Discriminating depositional environments of sands from modern source terranes using modal analysis, Sedimentary Geology, v.143, pp. 149-167.
- Kasper-Zubillaga, J.J. y Carranza-Edwards, A. (2005) Grain size discrimination between sands of desert and coastal dunes from northwestern México, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 22, pp. 383-390.
- Kasper Zubillaga, J.J., Carranza-Edwards, A., y Rosales-Hoz, L., (1999). Petrography and geochemistry of Holocene sands in the western Gulf of México: implications for provenance and tectonic setting, Journal of Sediment. Research, v. 69, pp. 1003-1010.
- Kasper-Zubillaga, J.J. y Faustinos-Morales, R. (2007) Scanning electron microscopy análisis of quartz grains in desert and coastal dune sands (Altar Desert, NW México): Ciencias Marinas, v. 33, pp. 11-22.
- Kasper-Zubillaga, J.J., Carranza-Edwards, A., y Morton-Bermea, O. (2008) Heavy metals and rare earth elements in coastal and inland dune sands of El Vizcaino desert, Baja California peninsula, México: Marine Georesources and Geotechnology, v. 26(3), pp. 172-188.
- Klaus, D. (1973) Las invasiones de aire frío en los trópicos a sotavento de las montañas Rocallosas, Geofísica Internacional, v. 13(2), pp. 99-143.
- Komar, P.D. (1976) Beach processes and sedimentation, Prentice Hall Inc., New Jersey.
- Komar, P.D e Inman, D.L. (1970) Longshore sand transport on beaches, Journal of Geophysical Research, v. 75(30), pp. 5914-5927.

- Krynine, P.D. (1940,) Petrology and génesis of the Third Bradford Sand, Penn. State College Mineral Industries Experiments Station Bulletin, v. 29, 134 p.
- Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Streckeisen, A. y Zanettin, B. (1986) A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram, *Journal of Petrology*, v. 27 (3), pp. 745-750.
- Lee, Y.I. (2009) Geochemistry of shales of the Upper Cretaceous Hayang Group, SE Korea: Implications for provenance and source weathering at an active continental margin, *Sedimentary Geology*, v. 215 (1-4), pp. 1-12.
- Le Maitre, R.W.1 (1976) The chemical variability of some common igneous rocks, *Journal of Petrology*, v. 17, pp. 589-637.
- Lewis, D.W. (1984) *Practical Sedimentology*, Hutchinson and Ross, Stroudsburg, Pa.
- Lozano-Santa Cruz, R., Verma, S.P., Girón, P., Velasco, F., Morán-Zenteno, D., Viera, F., y Chávez, G. (1995) Calibración preliminar de fluorescencia de rayos-X para análisis cuantitativo de elementos mayores en rocas ígneas. *Actas INAGEQ*, v. 1, pp. 203-208.
- Madhavaraju, J. y Ramasamy, S. (1999) Rare earth elements in limestones of Kallankurichcli Formations of Ariyalur Group, Tiruchirapalli Cretaceous, Tamil Nadu: *Journal of the Geological Society of India*, v. 54, pp. 291-301.
- Madhavaraju, J., Ramasamy, S., Mohan, S.P., Hussain, S.M., Gladwin, G., Gnanasir, N. y Stephen Pitchaimani, V. (2004) Petrography and surface textures on quartz grains of Nimar Sandstone, Bagh Beds, Madhya Pradesh-Implications of provenance and depositional environment: *Journal of the Geological Society of India*, v. 64, pp. 747-762.
- Madhavaraju, J., García y Barragan, J.C., Hussain, S.M. y Mohan, S.P. (2009) Microtextures on quartz grains in the beach sediments of Puerto Peñasco and Bahía Kino, Gulf of California, Sonora, México, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 26, num. 2, pp. 367-379.
- Marín-Guzmán, A.P., y Carranza-Edwards, A. (2011) Inferencia del transporte litoral dominante del Golfo de México, *Transporte Litoral, Interacciones del Planeta Tierra*, Gío-Argáez, R., y Rosalez-Hoz, M.T.L., Editores, ICML, UNAM, México D.F. pp. 39-46.

- Martínez, M.L., Moreno-Casasola, P., y Castillo, S. (1993) Biodiversidad costera: playas y dunas, Biodiversidad Marina y Costera de México, ed. S.I. Salazar-Vallejo & N.E. González, pp. 160-181, México, CIQRO-CONABIO.
- Martínez, M.L., Gallego-Fernández, J.B., García-Franco, J.G., Moctezuma, C., y Jiménez, C.D. (2006) Assessment of coastal dune vulnerability to natural and anthropogenic disturbances along the Gulf of México, *Environmental Conservation*, v. 33(2), pp. 109-117.
- McBride, E.F. (1984) Diagenetic processes that affect provenance determination in sandstone. In: Zuffa, G.G. (Ed), *Provenance of Arenites*, NATO Advanced Institutes Series C, v. 148, Reidel, Dordrecht, pp. 95-113.
- McBride, E.F. (1987) Diagenesis of the Maxon Sandstone (Early Cretaceous), Marathon Region, Texas: a diagenetic quartzarenite, *Journal of Geology*, v. 57, pp.98-107.
- McLennan, S.M (1989) Rare earth elements in sedimentary rocks: influences of provenance and sedimentary processes, In: B.R. Lipin and G.A. McKay (Eds.), *Geochemistry and Mineralogy of Rare Earth Elements*, Mineralogical Society of America, v. 21, pp. 169-200.
- McLennan, S.M. (1991) Sedimentary rocks and crustal evolution: tectonic setting and secular trends, *Journal of Geology*, v. 99, pp. 1-21.
- McLennan, S.M. (2001) Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust, *Geochemistry, Geophysics. Geosystems*, 2, paper number 2000GC000109, Published April 20, 2001.
- McLennan, S.M., y Taylor, S.R. (1991), Sedimentary rocks and crustal evolution: tectonic setting and secular trends, *Journal of Geology*, v. 99, pp. 1-21.
- McLennan, S.M., Nance, W.B. y Taylor, S.R. (1980) Rare earth element-thorium correlations in sedimentary rocks and the composition of the continental crust, *Geochimica Cosmochimica Acta*, v. 44, pp. 1833-1839.
- McLennan, S.M., Taylor, S.R., McCulloch, M.T. y Maynard, J.B. (1990) Geochemical and Nd-Sr isotopic composition of deep-sea turbidites: Crustal evolution and plate tectonic associations, *Geochimica Cosmochimica Acta*, v. 54, pp. 2015-2050.

- McLennan, S.M., Hemming, S., McDaniel, D.K. y Hanson, G.N. (1993) Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics. In: Johnson, M.J., Basu, A., (Eds.), Processes controlling the composition of clastic sediments, Geological Society of America Special Paper, v. 284, pp. 21-40.
- Moral-Cardona, J.P., Gutiérrez-Mas, J.M., Sánchez-Bellón, A., López-Aguayo, F. y Caballero, M.A. (1997) Provenance of multicycle quartz arenites of Pliocene age at Arcos, Southwestern Spain: *Sedimentary Geology*, v. 112, pp. 251-261.
- Nagarajan, R., Madhavaraju, J., Nagendra, R., Armstrong-Altrin, J.S. y Moutte, J., 2007a, Petrography and Geochemistry of terrigenous sedimentary rocks in the Neoproterozoic Rabanpalli Formation, Bhima Basin, Southern India: Implications for Paleoweathering condition, Provenance, and Source Rock Composition, *Journal of Geological Society of India*, v. 70, pp. 297-312.
- Nagarajan, R., Madhavaraju, J., Nagendra, R., Armstrong-Altrin, J.S. y Moutte, J., 2007b, Geochemistry of Neoproterozoic Shales of Rabanpalli Formation, Bhima Basin, northern Karnataka, Southern India: Implications for Provenance and paleoredox conditions, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 24 (2), pp. 150-160.
- Nesbitt, H.W., y Young, G.M. (1982) Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites, *Nature*, v. 199, pp. 715-717.
- Nesbitt, H.W., Fedo, C.M. y Young, G.M. (2006) Quartz and feldspar stability, steady and non-steady state weathering and petrogenesis of siliciclastic sands and muds, *Journal of Geology*, v. 105(2), pp. 173-192.
- Orozco-Esquivel, M. T., Ferrari, L., Eguchi, M., Tagami, T., Petrone, C., y Jacobo-Albarran, J. (2003) The Eastern Alkaline Province (Mexico) revised: geology, geochronology and geochemistry of Neogene volcanism in Veracruz State, en 99ª Reunión Anual, Geological Society of America, Cordilleran Section, Puerto Vallarta, Jal., Libro de resúmenes, p. 58.
- Palmer, R.H. (1927) Geology of Eastern Hidalgo and adjacent parts of Veracruz, Mexico, *Bulletin of American Association of Petroleum Geologists*, v. 2, N°12, pp. 1321-1328.
- Pe-Piper, G., Triantafyllidis, S. y Piper, D.J.E. (2008) Geochemical identification of clastic sediment provenance from known sources of similar geology: The Cretaceous Scotian Basin, Canada, *Journal of Sedimentary Research*, v. 78 (9), pp. 595-607.

- Pettijohn, F.J. (1963) Chemical composition of sandstones-excluding carbonate and volcanic sands, Data of Geochemistry, 6th Ed. U.S. Geological Survey Professional Paper, v. 449S, pp. 19.
- Pettijohn, F.J. (1975) Sedimentary Rocks, Harper and Row Publishers, New York.
- Pettijohn, F.J., Potter, P.E. y Sieber, R. (1972) Sand and Sandstone, Springer-Verlag, New York, 618 p.
- Potter, P.E. (1978) Petrology and chemistry of big river sands, Journal of Geology, v. 86, pp. 423-4449.
- Potter, P.E. (1985) Fraction analyses of modern river sand of Rios Negros and Solimoes, Brazil, implications of the origin of quartz-rich sandstones, Revista Brasileira de Geociencias., v. 15, pp. 31-35.
- Potter, P.E. (1986) South America and a few grains of sand: part 1-beach sands, Journal of Geology, 94, pp. 301-319.
- Price, J.R., y Veibel, M.A. (2003) Chemical weathering indices applied to weathering profiles developed on heterogeneous felsic metamorphic parent rocks, Chemical geology, v. 202(3-4), pp. 397-416.
- Ramírez-Munóz, M.A. (2012) Geoquímica de sedimentos de playa Chachalacas Veracruz, implicaciones de procedencia y ambiente tectónico, Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Rojas-Álvarez, J. (2008) Respuesta de la circulación oceánica ante el forzamiento de eventos de norte en la zona del Sistema Arrecifal Veracruzano, Universidad Nacional Autónoma de México (Tesis de Maestría), pp. 5-8.
- Rollinson, H.R. (1993) Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation, Longman Group, England, 352 p.
- Rosales-Hoz, L., Carranza-Edwards, A., Santiago-Pérez, S. y Morales de la Garza, E. (2005) Spatial trends in the geochemical composition of sediments in the Panuco River discharge area, Gulf of Mexico, Environmental Geology, v. 48, pp. 496-506.

- Rosales-Lagarde, L., Centeno-García, E., Dostal, J., Sour-Tovar, F., Ochoa-Carrillo, H., y Quiroz-Barroso, S. (2005) The Tuzancoa Formation: Evidence of an Early Permian submarine continental Arc in East-Central Mexico, *International Geology Review*, v. 47 (9), pp. 901-919.
- Roser, B.P. y Korsh, R.J. (1988) Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites determined using discrimination function analysis of major-element data, *Chemical Geology*, v. 67, pp. 119-139.
- Ryan, K.M. y Williams, D.M. (2007) Testing the reliability of discrimination diagrams for determining the tectonic depositional environment of ancient sedimentary basins, *Chemical Geology*, v. 242 (1-2), pp. 103-125.
- Sánchez-Zavala, J.L., y. Centeno García, E. (2000) Técnicas y Aplicaciones del estudio de sedimentos terrígenos de grano fino: procedencia y tectónica. Instituto de Geología, UNAM.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (2011) Estadísticas del Agua en México, Ed. 2011, México, D.F.
- Selvaraj, K., y Chen, C.T.A. (2006) Moderate chemical weathering of subtropical Taiwan: Constraints from solid-phase geochemistry of sediments and sedimentary rocks, *Journal of Geology*, v. 114(1), pp. 101-116.
- Servicio Geológico Mexicano (1997a) Carta Geológico Minera Ciudad Valles F14-8, S.L.P., Querétaro, Hidalgo, Guanajuato y Veracruz, Esc. 1:250 000.
- Servicio Geológico Mexicano (1997b) Carta Geológico Minera Pachuca F14-11, Querétaro, Hidalgo, Edomex, Puebla y Veracruz, Esc. 1:250 000.
- Servicio Geológico Mexicano (1999) Carta Geológico Minera Ciudad Mante F14-5, S.L.P., Tamaulipas y Veracruz, Esc. 1:250 000.
- Servicio Geológico Mexicano (2004a) Carta Geológico Minera Tampico F14-3-6, Tamaulipas y Veracruz, Esc. 1:250 000.
- Servicio Geológico Mexicano (2004b) Carta Geológico Minera Poza Rica F14-12, Veracruz, Esc. 1:250 000.

- Servicio Geológico Mexicano (2004c) Carta Geológico Minera Tamiahua F14-9, Veracruz, Esc. 1:250 000.
- Servicio Geológico Mexicano (2007) Monografía Geológico Minera del Estado de Veracruz, Segunda Edición, Abril del 2007, SGM.
- Suttner, L.J., Basu, A. y Mack, G.H. (1981) Climate and the origin of quartz arenites, *Journal Sedimentary Petrology*, v. 51, pp. 1235-1246.
- Swett, Keene, Klein, G.D. y Smit, D.E. (1971) A Cambrian tidal sand body-the Eriboll Sandstone of northwest Scotland: an ancient-recent analog., *Journal of Geology*, v. 79, pp. 400-415.
- Taylor, S.R., y McLennan, S.M. (1985) *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*, Blackwell, Oxford, UK, 349 p.
- Varga, A., Raucsik, B., Hartyáni, Z. y Szakmány, G. (2007) Paleoweathering conditions of Upper Carboniferous siliciclastic rocks of SW Hungary, *Central European Geology*, v. 50/1, pp. 3-18.
- Veizer, J. (1978) Secular variations in the composition of sedimentary carbonate rocks II. Fe, Mn, Ca, Mg, Si and minor constituents, *Precambrian Research*, v. 6, pp. 381-413.
- Verma, S. (2000) Geochemical evidence for a lithospheric source for magmas from Los Humeros caldera, Puebla, Mexico, *Chemical Geology*, v. 164, pp. 35-60.
- Verma, S. (2001a) Geochemical evidence for a Rift-Related origin of bimodal volcanism at Meseta Rio San Juan, North-Central Mexican Volcanic Belt, *International Geology Review*, v. 43, pp. 475-493.
- Verma, S. (2001b) Geochemical evidence for a Lithospheric source for magmas from Aocolco Caldera, Eastern Mexican Volcanic Belt, *International Geology Review*, v. 43, pp. 31-51.
- Verma, S., Lozano-Santa Cruz, R., Girón-García, P., y Velasco, F. (1996) Calibración preliminar de fluorescencia de rayos-X para análisis cuantitativo de elementos traza en rocas ígneas. *Actas INAGEQ*, 2 (1996), pp. 237-242.

- Viers, J., Roddaz, M., Filizola, N., Guyot, J.L., Sondag, F., Brunet, P., Zouiten, C., Boucayrand, C., Martin, F. y Boaventura, G.R. (2008) Seasonal and provenance controls on Nd-Sr isotopic compositions of Amazon rivers suspended sediments and implications for Nd and Sr fluxes exported to the Atlantic Ocean: Earth and Planetary Science Letters, v. 274 (3-4), pp. 511-523.
- Wang, Y., Weiming, F. y Feng, G. (2003) Geochemistry of early Mesozoic potassium-rich diorites-granodiorites in southeastern Hunan Province, South China: Petrogenesis and tectonic implications, *Geochemical Journal*, v. 37, pp. 427-448.
- Weltje, G.J. (2006) Ternary sandstone composition and provenance: an evaluation of Dickinson Model. In: Buccianti, A., Mateu-Figueras, G., Pawlowsky-Glahn, V. (Eds.), *Compositional Data Analysis in the Geosciences: From Theory of Practice*, Geological Society, London, pp. 79-99, Special Publications, No. 264.
- Whaley, W.B.; y Krinsley, D.H. (1974) A scanning electron microscope evidence for offshore-onshore sand transport at Fire Island, New York, USA, *Sedimentology*, v. 40(1), pp. 63-77.
- Wrokiewics, D.J., y Condie, K.C. (1987) Geochemistry of Archaean shales from the Witwatersand supergroup, South Africa, Source-area weathering and provenance, *Geochimica Cosmochimica Acta*, v. 51, pp. 2401-2416.