



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**POSGRADO EN CIENCIAS DEL MAR Y  
LIMNOLOGÍA**

**ESTUDIO SEDIMENTOLÓGICO-MAGNÉTICO  
EN ARENAS DE PLAYAS DE COLIMA, MÉXICO**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**MAESTRA EN CIENCIAS**

**P R E S E N T A:**

**ING. LETICIA SÁNCHEZ GUILLÉN**

**DIRECTORES:**

**DR. JAIME URRUTIA FUCUGAUCHI**

**DR. ARTURO CARRANZA EDWARDS**



2011



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.

## **POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU**

**"Significa la convicción de que la raza nuestra elaborará una cultura de tendencias nuevas, de esencia espiritual y libérrima"**

**José Vasconcelos.**

**POR LA BLANDA ARENA QUE LAME EL MAR...**

A.R y F.L.

<b>ÍNDICE .....</b>	<b>PÀGINA</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>II</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>V</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>1</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>3</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>5</b>
<b>2. ANTECEDENTES.....</b>	<b>9</b>
<b>3. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.....</b>	<b>13</b>
<b>3.1 Hipótesis general.....</b>	<b>13</b>
<b>3.2 Objetivos.....</b>	<b>13</b>
<b>4. ÁREA DE ESTUDIO.....</b>	<b>15</b>
<b>5. MATERIALES Y METODOS.....</b>	<b>19</b>
<b>5.1 Actividades de campo.....</b>	<b>19</b>
<b>5.2 Actividades de laboratorio.....</b>	<b>19</b>
<b>6. CARACTERÍSTICA TEXTURAL.....</b>	<b>27</b>
<b>6.1 Tamaño gráfico promedio.....</b>	<b>27</b>
<b>6.2 Desviación gráfica inclusiva.....</b>	<b>32</b>
<b>6.3 Asimetría.....</b>	<b>33</b>
<b>6.4 Curtosis.....</b>	<b>34</b>
<b>7. CARACTERÍSTICA COMPOSICIONAL.....</b>	<b>35</b>
<b>7.1 Petrología.....</b>	<b>35</b>
<b>7.2 Geoquímica.....</b>	<b>40</b>
<b>8. CARACTERÍSTICA DE PROPIEDADES MAGNÉTICAS.....</b>	<b>63</b>
<b>8.1 Susceptibilidad magnética.....</b>	<b>65</b>
<b>8.2 Magnetización Remanente Natural.....</b>	<b>72</b>
<b>9. INTERACCIÓN ENTRE TEXTURA Y MAGNÉTISMO</b>	
<b>DE LAS ARENAS DE PLAYA.....</b>	<b>75</b>
<b>10. CONCLUSIONES.....</b>	<b>79</b>

<b>11. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>83</b>
<b>ANEXO 1. Parámetros analizados en los diferentes tipos de muestra de arenas. ....</b>	<b>101</b>
<b>ANEXO 2. Fotografías de muestras de arenas de playa.....</b>	<b>103</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Zonas de playa.....	9
Figura 2. Zona de estudio en la costa de Colima.....	18
Figura 3. Muestra sedimentaria de los arreglos mineralógicos en las subzonas de playa. ....	21
Figura 4a. Susceptibilímetro MS2B .....	25
Figura 4b. Magnetómetro MOLSPIN.....	25
Figura 5. Arenas en las diferentes subzonas de playa.....	29
Figura 6. Tamaño gráfico promedio $Mz(\phi)$ .. .....	31
Figura 7. Frecuencia acumulativa de $Mz(\phi)$ .....	32
Figura 8. Desviación gráfica inclusiva ( $\sigma_1\phi$ ).....	33
Figura 9. Asimetría ( $S_{ki}$ ). .....	34
Figura 10. Curtosis ( $K_G$ ). .....	34
Figura 11. Componentes mineralógicos. ....	37
Figura 12. Composición petrológica de las arenas de playa de Colima. ....	38
Figura 13. Índice de madurez ( $I_M$ ) vs. Índice de procedencia ( $I_P$ ).....	40
Figura 14. Elementos traza en muestra total.....	42
Figura 15. Correlaciones entre parámetros texturales y geoquímicos.....	45
Figura 16. Elementos traza (ppm) en muestras con concentrados magnéticos en las diversas subzonas. ....	49
Figura 17. Elementos traza (ppm) en concentrados no magnéticos. ....	50
Figura 18. Concentración de Zr. ....	51
Figura 19. Elementos mayores (wt%) en muestra total. ....	54
Figura 20. Correlaciones de elementos mayores en muestra total. ....	56

<b>Figura 21. Abundancia de compuestos comunes en plagioclasas y feldespatos. ....</b>	<b>57</b>
<b>Figura 22. Elementos mayores (%) de los tres tipos de muestras en las tres subzonas de playa para los tres sectores considerados.....</b>	<b>60</b>
<b>Figura 23. Densidad de las arenas de playa vs. MRN .....</b>	<b>61</b>
<b>Figura 24. Material diamagnético.....</b>	<b>64</b>
<b>Figura 25. Material paramagnético .....</b>	<b>64</b>
<b>Figura 26. Material ferromagnético. ....</b>	<b>65</b>
<b>Figura 27. Susceptibilidad magnética en muestra total.....</b>	<b>68</b>
<b>Figura 28. Susceptibilidad magnética en concentrado magnético.....</b>	<b>69</b>
<b>Figura 29. Susceptibilidad magnética en concentrado no magnético.....</b>	<b>70</b>
<b>Figura 30a. Correlación de MRN vs. X .....</b>	<b>73</b>
<b>Figura 30b. MRN vs. IAP .....</b>	<b>73</b>
<b>Figura 31a. Correlaciones positivas de <math>Mz(\phi)</math> vs. <math>X_{bf}</math>, MP, <math>MnO_3</math>.....</b>	<b>77</b>
<b>Figura 31b. Correlaciones negativas de <math>Mz(\phi)</math> vs. <math>\sigma_1(\phi)</math>, <math>SiO_2</math> y <math>K_2O</math>.....</b>	<b>77</b>
<b>Figura 32a. Correlaciones positivas entre MP vs. MRN, <math>TiO_2</math>, MnO.....</b>	<b>78</b>
<b>Figura 32 b. Correlaciones negativas entre MP vs. <math>Na_2O</math>, <math>SiO_2</math> y Ski.....</b>	<b>78</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1. Dimensiones de las once playas estudiadas ,</b>	<b>11</b>
<b>Tabla 2. Parámetros texturales y petrológicos</b>	<b>30</b>
<b>Tabla 3. Índice de madurez (<math>I_M</math>) e índice de procedencia (<math>I_P</math>)</b>	<b>39</b>
<b>Tabla 4. Elementos traza (ppm) en muestra total</b>	<b>41</b>
<b>Tabla 5. Correlación de elementos traza en muestra total.</b>	<b>43</b>
<b>Tabla 6. Elementos traza (ppm) en concentrados magnéticos.</b>	<b>47</b>
<b>Tabla 7. Elementos traza (ppm) en concentrados no magnéticos.</b>	<b>48</b>
<b>Tabla 8. Elementos mayores (wt%), IQA, IAP en muestra total.</b>	<b>53</b>
<b>Tabla 9. Elementos mayores (wt %) en los concentrados magnéticos y no magnéticos.</b>	<b>62</b>
<b>Tabla 10. Susceptibilidad magnética en baja y alta frecuencia, magnetización remanente natural</b>	<b>66</b>
<b>Tabla 11. Correlación de susceptibilidad magnética en concentrado magnético vs. petrología</b>	<b>62</b>



## **RESUMEN**

Las playas, formadas por acumulación de sedimentos, son ambientes de sedimentación dinámica controlados por un amplio rango de procesos, incluyendo oleaje, corrientes marinas, vientos, mareas, cambios de nivel del mar, morfología, tectónica, características del margen continental y vegetación. Se extienden desde la línea media de bajamar hasta elementos fisiográficos característicos del dominio terrestre, tales como los campos de dunas, promontorios marinos y/o áreas de cobertura vegetal permanente. Los estudios de los sedimentos en playas permiten investigar dichos procesos y las características del área fuente, procedencia, transporte y dinámica de líneas de costa. En este trabajo se presentan los resultados del estudio geológico y geofísico realizado en arenas de playas de la costa de Colima, empleando para ello métodos sedimentológicos, geoquímicos y magnéticos. Entre los objetivos principales del estudio se tiene el análisis y correlación entre características sedimentológicas y magnéticas y la determinación de contenidos de minerales metálicos (óxidos de hierro y titanio). A lo largo de la línea de costa abundan arenas medias a finas moderadamente clasificadas a bien clasificadas. Hacia el extremo sureste de la costa se observan arenas más finas de colores más oscuros y con mejor clasificación que las del extremo noroeste. También hacia la porción sureste existe mayor abundancia de minerales pesados de origen volcánico con una buena clasificación, con valores altos de magnetización remanente natural que se distinguen por susceptibilidades magnéticas elevadas asociadas con la abundancia de óxidos de hierro y titanio. En los análisis se observa una atenuación de hasta un orden de magnitud en los valores de susceptibilidad magnética y magnetización remanente natural en muestra total, debida a la abundancia de cuarzo en el extremo noroeste de la costa. Se infiere que hay un mayor desgaste en las arenas de playas del extremo sureste generado principalmente por oleaje, viento y mareas en rocas de origen volcánico que afloran en la región. La zona de supraplaya en bahía de Santiago se identifica como una zona de playa

aislada de la costa de Colima donde los procesos de desgaste en las arenas parecen estar limitados por la protección natural que presenta la zona.

**Palabras clave:** Playas de Colima, Océano Pacífico, textura de sedimentos, petrología, geoquímica, susceptibilidad magnética, magnetización remanente, concentrados magnéticos.

## **ABSTRACT**

The beaches are formed by sediment accumulation where sediment dynamics controls this environment for a wide range of processes, including waves, currents, winds, tides, sea level changes, morphology, tectonics, continental margin characteristics and vegetation. They range from the average low tide line to the physiographic elements characteristic of land domain, such as sand dunes, marine cliffs and / or areas of permanent vegetative cover. Studies of sediment on beaches contribute to understand these processes and the source area origin, transport and dynamics of sandy coastlines. This paper presents the results of a geological and geophysical study of sandy beaches on the coast of Colima, employing sedimentological, geochemical and magnetic methods. The main objectives of the study are the analysis and correlation between magnetic and sedimentological characteristics and the determination of metallic minerals contents (iron oxides and titanium). Along the coastline there are abundant medium to fine sands moderately sorted to well sorted. Towards the southeast coast of the finest sand look darker color and better classification compared with the northwest extreme. Towards the southeast portion there is a greater abundance of heavy minerals of volcanic origin with a high rank, with higher values of natural remnant magnetization as characterized by high magnetic susceptibilities associated with the abundance of iron and titanium oxides. This study reveals an attenuation of one order of magnitude in magnetic susceptibility and natural remnant magnetization in bulk sample, due to relative abundance of quartz in the far northwest sandy coast. It is inferred that there is more wave attack on the sands of beaches from the southeastern extreme generated primarily by waves, wind and tides in volcanic rocks that outcrop in the region. Backshore area in Santiago Bay is identified as an area of protected beach off the coast of Colima where the processes of weathering of the sands seem to be limited by this natural barrier present in the area.

**Keywords:** Colima beaches, Pacific Ocean, sediment texture, petrology, geochemistry, magnetic susceptibility, remanent magnetization, magnetic concentrates.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las playas están formadas por acumulación de sedimentos, los cuales están expuestos a la acción del oleaje, las mareas, el viento, la salinidad y/o la biota e integran un límite natural entre la corteza continental y la corteza oceánica. Se extienden desde la línea media de bajamar hasta algún cambio fisiográfico como los campos de dunas, promontorios marinos y/o áreas donde se instaura la vegetación permanente (Komar, 1998; Bird, 2000; Kusky, 2008). Constituyen ambientes dinámicos donde las corrientes marinas y el viento transportan el material por lo cual éstas nunca preservan su forma, composición o límites ya sean internos o externos generados por el oleaje, las corrientes y las mareas (Carranza-Edwards y Caso-Chávez, 1994). Las playas constituyen importantes ambientes de depósito de sedimentos, cuya influencia se refleja en las características, origen y evolución de los márgenes continentales. El perfil de la playa representa un equilibrio dinámico entre el transporte de sedimentos hacia el mar, hacia el continente y a lo largo de la costa. Los perfiles presentan constante cambio por procesos de erosión y redepositación de sedimentos (Grigsby, 1990; Moreno-Casasola, 2004; Kusky, 2008). Las arenas se consideran elementos dinámicos en la formación de playas y el estudio de sus características ayuda al diagnóstico de las transformaciones que se llevan en el medio costero (Guerra-García *et al.*, 2009). La demanda de recursos geológicos terrestres asociada con el incremento de centros de población y el uso intensivo de los litorales hace que las playas se estudien por su potencial turístico, por la conservación de especies y eventualmente como guías en la exploración de recursos minerales tierra adentro. La necesidad de estudios de detalle en las playas que presentan problemas complejos para su conservación y uso sustentable se hace presente en las últimas décadas y se ha intensificado el interés por éstas, por su alta variabilidad y por los sedimentos que las integran así como por los cambios asociados con fluctuaciones del nivel del mar y los diferentes procesos costeros y meteorológicos. Las relaciones entre la composición de

sedimentos y el clima se encuentran documentadas en trabajos como los de Basu, 1985; Potter, 1986; Roser y Korsch, 1986; Ibbeken y Schleyer, 1991; Carranza-Edwards y Rosales-Hoz, 1994, 1995; Critelli *et al.*, 1997; Le Pera y Critelli, 1997; Holail y Moghazi, 1998; Arribas *et al.*, 2000; Carranza-Edwards *et al.*, 2001. Existen procesos físicos y químicos que provocan cambios en la distribución del tamaño de grano en un determinado sitio de depósito. La composición de los sedimentos de playa, su textura, sus variaciones geoquímicas son controladas por factores como las olas, el viento, el clima, el relieve y las descargas fluviales adyacentes a la playa. La energía con que se desplaza el sedimento depende de la velocidad de la corriente del medio de transporte, así, los sedimentos finos de bajo peso específico se pueden encontrar en zonas de energía mínima y dependen principalmente de la composición de la roca fuente. El estudio de dichos parámetros se emplea para la caracterización sedimentaria (Folk, 1980; Ibbeken y Schleyer, 1991; Carranza-Edwards y Rosales-Hoz, 1995; Carranza-Edwards, 2001; Kasper-Zubillaga y Carranza-Edwards *et al.*, 2005) y es un requisito para la interpretación de procedencia y ambientes sedimentarios de depósito (Morton, 1985; Morton y Hallsworth, 1999; Copjaková *et al.*, 2005; Oszczypko y Salata, 2005), además de ser una herramienta de gran utilidad en la planeación de construcción de muelles (Crickmore *et al.*, 1990), para programas de seguimiento litoral y diseño de obras de protección o regeneración de playas (Nachite *et al.*, 2005). Los sedimentos depositados en grandes secuencias sedimentarias tienen la capacidad de registrar las variaciones del campo magnético terrestre (Tauxe, 1993; Dunlop y Özdemir, 1997; Love, 2000). Los sedimentos y sus propiedades magnéticas guardan un registro (Rey *et al.*, 2005) de cambios del clima, estudiado a partir de parámetros texturales (tamaño de grano), composición de minerales ligeros (cuarzo, feldespato) y pesados (gravedad específica mayor que  $2.50 \text{ g/cm}^3$ ), geoquímica de elementos mayores ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{MgO}$  y  $\text{CaO}$ ) y elementos traza con los cuales es posible obtener información sobre procedencia, diagénesis, alteración

química y procesos hidráulicos (McArthur y Walsh, 1984; Grandjean *et al.*, 1988; Rosales-Hoz y Carranza-Edwards, 2001; Frihy y Dewidar, 2003; Olivier y Boyet, 2006; Rosales-Hoz *et al.*, 2006). Los parámetros estadísticos como la clasificación y el tamaño promedio de los clastos reflejan condiciones de energía en el ambiente (Visher, 1969; Sly *et al.*, 1983). El transporte de sedimentos influye en la mineralogía y en las propiedades de la fracción magnética mineral (Dearing, 2000; Martínez-Monasterio *et al.*, 2000; Oldfield *et al.*, 1985). Los minerales pesados se consideran buenos trazadores naturales debido a su resistencia al intemperismo y a su comportamiento hidrodinámico (King, 1972; Pettijohn, 1975; Da Silva, 1979; Razjigaeva y Naumova, 1992; Frihy y Komar, 1993; Hounslow y Morton, 2004; Booth, *et al.*, 2005; Okay y Ergüin, 2005) y tienden a concentrarse en las arenas finas. Anfuso y colaboradores (1999), Cabrera-Ramírez y Carranza-Edwards (2002) analizaron minerales pesados para correlacionar el tamaño de sedimentos de playa con la roca fuente. La ocurrencia de elevadas concentraciones de minerales pesados económicamente valiosos (minerales de placer) en zonas costeras es tal que ha incrementado el interés por su exploración y explotación en diferentes regiones del mundo (Perissoratis *et al.*, 1987; Berquist *et al.*, 1990; Li y Komar, 1992; Cook *et al.*, 1992; Lenoble *et al.*, 1995; Schwartz *et al.*, 1995; Gent *et al.*, 2005; Gujar, *et al.*, 2007) sin embargo, su explotación debe condicionarse a la no afectación ambiental. El magnetismo de una roca es la respuesta de varios factores que incluyen a las propiedades físicas y químicas tales como tipo y tamaño de grano de minerales magnéticos, arreglos texturales, interacciones magnéticas y estructura cristalina. En los estudios de magnetismo ambiental se emplean determinaciones de diferentes parámetros que proveen información sobre las propiedades magnéticas de rocas y de sedimentos (Thompson y Oldfield, 1986; Butler, 1992; Walden, 1999; Maher *et al.*, 1999). Los estudios de geomagnetismo y paleomagnetismo han sido de ayuda en la orientación geográfica de topógrafos, geólogos, marineros, etc. Las investigaciones combinadas de parámetros magnéticos, sedimentológicos,

granulométricos y geoquímicos permiten relacionar ambientes físicos y químicos predominantes durante la formación, depósito y procesos post-deposicionales (Thompson y Oldfield, 1986; Oldfield, 1991; Yu y Oldfield, 1993; Maher *et al.*, 1999; Hesse y Stoltz, 1999) para interpretar el origen de sedimentos en ambientes fluviales, glaciares y de mar profundo (Carmichael, 1982; Hu *et al.*, 2000; Alekseeva *et al.*, 2003; Egli y Spassov, 2003; Hounslow, 2003; Meynadier *et al.*, 2003, Gawali, *et al.*, 2010). La susceptibilidad magnética es un parámetro dependiente de la concentración y tipo de mineral magnético que se tenga. Los óxidos de hierro y titanio (forman parte de los primeros minerales que cristalizan al ocurrir una erupción volcánica) son los minerales que proporcionan la mayor cantidad de magnetización en las rocas, su composición química, tamaño y tipo de oxidación indican el tipo de alteración a la que se han expuesto los minerales a causa del medio ambiente (O'Reilly, 1984; Fujimoto y Kikawa, 1989). La susceptibilidad magnética es uno de los parámetros geofísicos de las rocas que se ha empleado como herramienta en diferentes disciplinas de estudio ya que proporciona información sobre las características nutritivas (orgánicas e inorgánicas) de los suelos (Langton, 1986; Jong, *et al.*, 1998; Jong *et al.*, 2000; Peitiado, *et al.*, 2002; Plingguo, *et al.*, 2009), genera índices para entender hábitos migratorios de fauna (Fuentes-Farias *et al.*, 2010; Lohmann and Lohmann, 2010). En estudios geológicos la susceptibilidad magnética se emplea para entender la procedencia de sedimentos y se puede medir de una forma relativamente fácil con instrumentos de alta sensibilidad magnética (Bhongsuwan y Ponathong, 2002). Además es útil como indicador en análisis paleoclimáticos y paleoceanográficos (Pérez-Cruz y Urrutia-Fucugauchi, 2009, 2010).

## 2. ANTECEDENTES

Los estudios sobre geomorfología, morfología y aspectos sedimentarios han permitido determinar y correlacionar diferentes características de los litorales del mundo las cuales dependen de variables como el relieve de la zona y el clima. Los litorales mexicanos presentan condiciones climáticas favorables que propician un importante y rápido desarrollo de material deleznable que alimenta las zonas de playa. La determinación de los componentes petrológicos en sedimentos recientes (ambientes de playa) está ligada con la composición de la roca fuente y a la acumulación de metales que se concentran en la zona de supraplaya (Fig.1) (Kunzendorf, 1986) (zona de dominio eólico, generalmente se haya seca, rica en minerales metálicos que por su elevada densidad son difíciles de mover). En la costa de Colima las masas de agua durante el verano tienen una dirección predominante hacia el noroeste y en invierno hacia el sureste (Fernández-Eguiarte *et al.*, 1992a, 1992b, 2010a, 2010b).

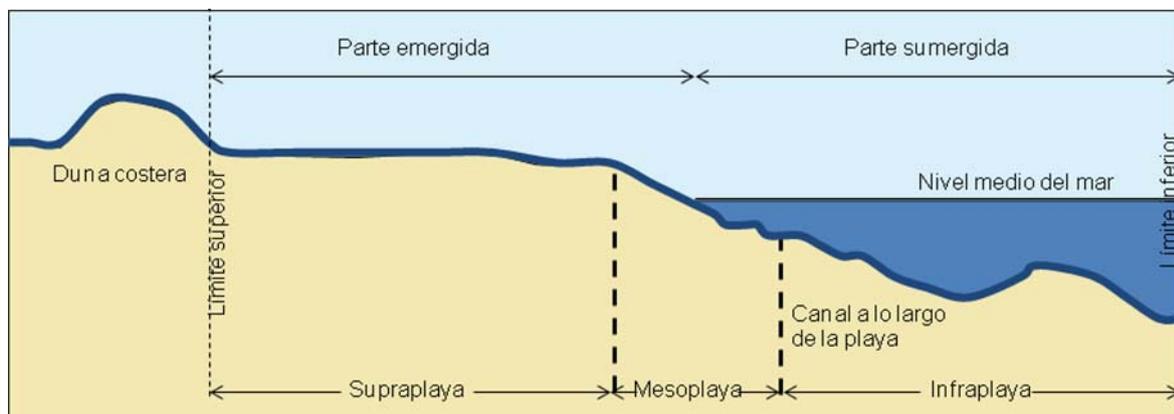


Figura 1. Zonas de playa. Modificada de Carranza-Edwards y Caso-Chávez, 1994.

La costa del Océano Pacífico tiene una forma y tamaño variable, se le denomina costa de colisión debido a la interacción de la placa de Cocos con la placa Norteamericana (Bandy *et al.*, 1995; Ramírez-Herrera y Urrutia-Fucugauchi, 1999; Ramírez-Herrera *et al.*, 2011) y

genera una estrecha plataforma que se engrosa hacia la boca de los ríos más grandes (Bandy *et al.*, 1995; Cabrera-Ramírez y Carranza-Edwards, 2002). Estudios geológicos y geofísicos sugieren que dicha región se integra de cuatro zonas morfotectónicas y dos zonas de transición donde la costa de Colima es considerada una zona de subsidencia local con bajo relieve (Melbourne *et al.*, 1997) y abundantes rocas ígneas con edades que van desde el Cretácico hasta el Terciario superior. En proporciones inferiores existen rocas sedimentarias cretácicas (INEGI, 1970a, 1970b, 1970c, 1970d, 1970e) de origen marino fuertemente plegadas por las rupturas de la corteza terrestre y la actividad volcánica de la zona. Existen pequeños y aislados cuerpos de rocas metamórficas con edades del Jurásico además de zonas de aluvión. La zona de transición de Colima se compone de sedimentos terrígenos producidos por la descarga principal de los ríos Coahuayana y Armería extendiéndose hasta 2km en la plataforma continental (Ramírez-Herrera y Urrutia-Fucugauchi, 1999; INEGI, 1989a, 1989b). En el año 1976 Lancín y Carranza-Edwards reportaron abundancia de minerales negros y pesados inmersos en arenas finas de la playa Santiago, en Colima. Debido a la enorme descarga fluvial de la región y al retrabajo que conllevan los sedimentos depositados en playas de Colima la concentración promedio de carbonatos es pequeña (menos del 5%). En algunas arenas de playas con influencia de lagunas costeras el contenido de carbonato es más elevado que el promedio de toda la costa de Colima (Carranza-Edwards *et al.*, 1996). Las dimensiones de las once playas analizadas se indican en la Tabla 1. Son zonas protegidas de la ensenada las playas B, C y D, el resto de las playas se hayan ubicadas en zonas costeras de mar abierto.

Tabla 1. Dimensiones de las once playas estudiadas (INEGI, 1989a, 1989b).

Nombre de la playa	Símbolo	Longitud (m)	Ancho (m)
playa de Oro	A	2600	50-100
bahía Santiago	B	2400	30-100
bahía Manzanillo	C	4900	50
playa Ventanas	D	1400	50-120
playa de punta Campos	E	1200	10-40
playa Cuyutlán Oeste	F	1000	200
playa Cuyutlán Este	G	9700	50
playa Paraíso	H	3700	40-100
playa boca de Pascuales	I	3300	70
playa Tecuanillo	J	1000	130
playa de Apiza	K	3000	150



### **3. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS**

#### **3.1 Hipótesis general**

Las características sedimentológicas, texturales y composicionales en los sedimentos de playa pueden documentarse y estudiarse por medio de análisis de granulometría, petrología, petrofábrica y propiedades físicas. Los análisis empleando múltiples factores proporcionan una mayor resolución y caracterización de los sedimentos y de sus variaciones composicionales, texturales y sedimentológicas. Para las playas seleccionadas en el margen continental de Colima se espera encontrar un alto contenido de minerales magnéticos depositados en las playas estudiadas debido a que las rocas predominantes de la región son rocas volcánicas y también existen unidades de aluvión y roca caliza.

#### **3.2 Objetivos**

##### Objetivo general

- En el presente estudio se propone documentar y analizar por primera vez a detalle las variaciones texturales y composicionales de las arenas de once playas del estado de Colima para establecer la posible procedencia de estos sedimentos litorales mediante la caracterización de propiedades sedimentológicas, geoquímicas y magnéticas en una escala local.

##### Objetivos específicos

- Analizar las relaciones entre los diversos parámetros texturales de las arenas de playa, para inferir la influencia del ambiente de depósito en los sedimentos litorales.
- Investigar las interacciones entre petrología y geoquímica de los sedimentos de playa para inferir la influencia del aporte continental en los diferentes segmentos litorales.
- Investigar los parámetros de susceptibilidad magnética en sedimentos de playa para cuantificar grados de influencia que pueden tener las rocas fuentes sobre estos.

- Determinar la presencia de minerales magnéticos, diamagnéticos y paramagnéticos y su vinculación con la dinámica de playas y ríos como fuente de alimentación y transporte de arena.
- Investigar las relaciones entre parámetros sedimentológicos y magnéticos de arenas de playa para contribuir al entendimiento de origen y procedencia de sedimentos litorales en este sector del margen continental Pacífico, en el estado de Colima.

#### 4. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se localiza a lo largo de la línea de costa del estado de Colima, México. Colima se extiende en la región centro occidental de la República Mexicana desde los 18°41' hasta los 19°31' de latitud Norte y desde los 103°29' hasta los 104°41' de longitud Oeste (INEGI, 1989a). Al noroeste, Colima limita de forma natural con el río Cihuatlán, mientras que al noreste se encuentra el río la Lumbre ambos ríos nacen en Jalisco. El río Coahuayana forma una barrera natural en dirección sureste con el estado de Michoacán y al suroeste su límite son las playas de la costa del Océano Pacífico (Fig. 2).

Los límites de Colima abarcan parte de dos provincias fisiográficas de la República Mexicana: el Eje Neovolcánico y la Sierra Madre del Sur. La primera es una extensión de rocas volcánicas con enormes coladas de lavas, conos volcánicos, escudos volcánicos de basalto, depósitos de cenizas e incluye dos importantes volcanes: el nevado de Colima (se ubica en Jalisco) cuya altitud supera los 4200m y el volcán de Colima con una elevación de 4220m (INEGI, 1989a, 1989b). La provincia de la Sierra Madre del Sur está constituida de rocas ígneas (granitos) y rocas metamórficas cubriendo el 62.5% de la superficie estatal e incluye la región montañosa occidental, la cuenca del río Cihuatlán, el valle de Armería y la costa en conjunto (INEGI, 1989a, 1989b). Estas provincias forman terrenos muy accidentados que descienden hasta la línea de costa con cuerpos arenosos, bahías y lagunas. Los suelos que dominan la región tienen poco desarrollo y presentan textura arenosa y residual (INEGI, 1989a, 1989b). Estudios geológicos y geofísicos han mostrado que Colima tiene sismicidad alta debido a su interacción con la placa de Cocos y la placa Norteamericana (Astiz y Kanamori, 1984; Pardo, 1993; Pardo y Suárez, 1995; Suárez y Sánchez, 1996; Melbourne, *et al.*, 1997, SSN, 2011).

El régimen de precipitación en el estado de Colima varía desde la época de sequía donde solo se tienen precipitaciones de ~2 mm/mes (abril) hasta superar los 1000 mm/mes (septiembre)

en la temporada de lluvias que abarca los meses de junio a octubre y donde también se registran las tormentas más severas y es coincidente con la temporada de ondas tropicales y ciclones. Existe un registro instrumental desde el año 1941 a 2005 donde la precipitación media anual promedio es de 883.2 mm (CONAGUA, 2009).

Los vientos de la región van de norte-noreste, con velocidades de 1.5 m/s aproximadamente y los de mayor velocidad promedio (5.0m/s aprox.) tienen dirección oeste-suroeste (SMN, 1981; CNA, 2003) en condiciones normales. En la época de ciclones el comportamiento del viento cambia e incrementa su velocidad hasta alcanzar los 25 m/s o incluso rebasarlos (CENAPRED, 2006; SMN 1981, 2007). Por lo general a diario se registran dos pleamares y dos bajamares en la costa de Colima, éstas son muy variadas a lo largo de un año y oscilan desde los -0.4 m hasta 0.7 m. Durante la época de ciclones se han registrado olas de 11m de altura (Galicia-Pérez, *et al.*, 2007). La energía que dichas olas liberan abarca tres órdenes de magnitud (miles de joules), (NOAA, 2011).

El clima dominante de la región es de cálido a muy cálido y subhúmedo en la zona de la costa (principalmente en verano) conforme se aleja de ésta en dirección norte el clima cambia a semiseco, cálido-muy cálido (INEGI, 1989a; Fernández-Eguiarte *et al.*, 1992a, 1992b; INEGI, 2000; CONAGUA, 2009), la temperatura oscila entre los 18 a 20°C en invierno y supera los 32°C durante el verano (Tamayo, 2002; CONAGUA, 2009). El registro desde 1941 a 2005 marca una temperatura media anual de 25.3°C en la región (CONAGUA, 2009).

La zona estudiada cuenta con aportes de sedimentos acarreados por una red fluvial de más de diez ríos y extensas zonas lagunares que tienen conexión con el mar y depositan sedimentos a lo largo de la costa de Colima mediante tres importantes corrientes fluviales perennes que son los ríos Cihuatlán, Armería y Coahuayana los cuales serpentean y descienden principalmente sobre terrenos de rocas volcánicas aunque también se presentan algunos cuerpos de rocas

sedimentarias altamente deformadas en la parte centro y norte de la cuenca Cihuatlán. Estos ríos comprenden las tres principales cuencas hidrográficas de la región (INEGI, 1989a).

Cuenca del río Cihuatlán: Se extiende en un área de 793.3 km<sup>2</sup> de terrenos ígneos volcánicos y plutónicos en su mayoría además de calizas y aluvión. Al río Cihuatlán también se le denomina río Marabasco y desciende 123km en dirección suroeste desde Autlán de Navarro, Jalisco hasta el Océano Pacífico en barra de Navidad que es la frontera noroeste de Colima con el estado de Jalisco (INEGI, 1989b).

Cuenca del río Armería: El área que cubre esta cuenca es de 1835.8 km<sup>2</sup> debido a su extensión y escurrimiento superficial ésta es la cuenca más importante de la región y se origina en la sierra de Cacoma, Jalisco donde coexisten los ríos Tuxcacuesco, Capula, Jalapa, San Juan, y Ayaquila desembocando en boca de Pascuales. Recorre 294 km aproximadamente en varios afluentes (INEGI, 1989a, 1989b) sobre rocas ígneas de origen volcánico en su gran mayoría así como sobre calizas y aluvión en dirección N-S.

Cuenca del río Coahuayana: Abarca un área de 665.7 km<sup>2</sup>. El río del mismo nombre también nace en el estado de Jalisco (en el Cerro del Tigre) y desciende sobre calizas, rocas ígneas volcánicas y aluvión. Constituye una frontera natural en su porción sureste de 152 km aproximadamente con el estado de Michoacán (INEGI, 1989a, 1989b).

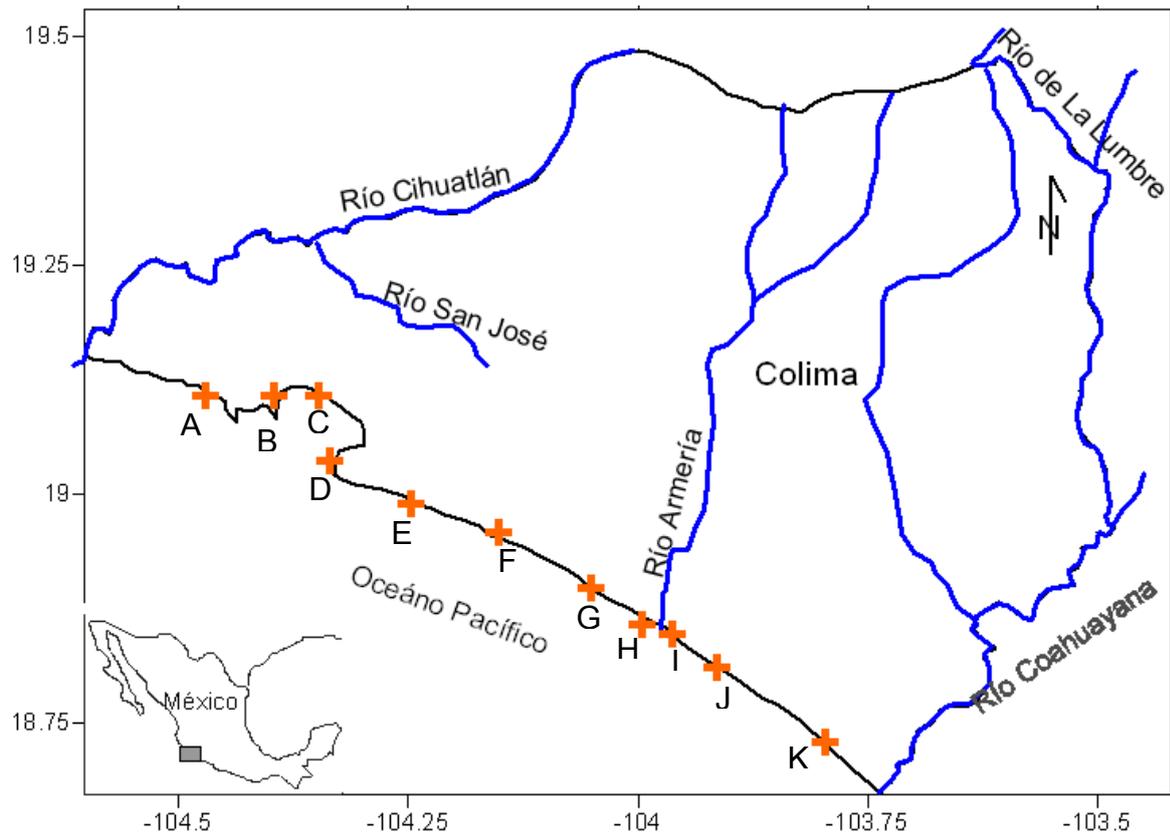


Figura 2. Zona de estudio en la costa de Colima. Las playas estudiadas están identificadas por las letras de A a K (ver Tabla 1).

## **5. MATERIALES Y METODOS**

Se describe brevemente los métodos empleados en los procesos de análisis, así como el material y equipo que se utilizó para la caracterización textural, la determinación geoquímica, la cuantificación de susceptibilidad magnética (X) y la magnetización remanente natural (MRN) del material sedimentario de las once playas estudiadas de la costa de Colima.

### **5.1 Actividades de campo**

Con ayuda de mapas topográficos, geológicos, atlas de carreteras de la República Mexicana, estatal y teodolito se ubicaron las coordenadas geográficas (latitud, longitud) y las dimensiones de los sitios muestreados alrededor de tres ríos (Cihuatlán, Armería y Coahuayana) importantes de Colima. Las once playas son: playa de Oro (A), bahía Santiago (B), bahía Manzanillo (C), playa Ventanas (D), playa de punta Campos (E), playa Cuyutlán Oeste (F), playa Cuyutlán Este (G), playa Paraíso (H), playa boca de Pascuales (I), playa Tecuanillo (J) y la playa de Apiza (K). Todas las zonas de estudio se ubican sobre la costa de Colima, México. Las playas B, C y D son áreas protegidas de la ensenada y el resto se hayan sin protección alguna en la zona costera de mar abierto. Iniciando el recorrido de muestreo de oeste a este se toman aproximadamente 200g de sedimentos superficiales para obtener sedimentos de la infraplaya (I), de la mesoplaya (M) y de la supraplaya (S) (Fig.1). Se introducen en frascos de vidrio debidamente etiquetados para su transporte, manipulación, futura identificación y análisis.

### **5.2 Actividades de laboratorio**

#### **Granulometría**

Determinación de tamaño de partícula: El tamaño de partícula es una característica cuantitativa sobre las dimensiones (diámetro) de los clastos. La determinación del tamaño de grano se realiza empleando métodos y equipo sofisticados como el analizador láser de tamaño

de partículas ó mediante un microscopio petrográfico ó con la técnica de tamizado que consiste en dejar pasar la muestra a través de tamices con apertura diferente correspondiente a los límites de clase de arenas en unidades phi ( $\phi$ ). La escala phi ( $\phi$ ) se usa como unidad de medición debido a que simplifica procesos matemáticos computacionales (Folk, 1980; Prothero y Schwab, 1999). En el Laboratorio de Sedimentología del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología (ICMyL), UNAM mediante la técnica de tamizado se obtuvo el tamaño de grano de los sedimentos en muestra total (Tabla 2). El tamaño del sedimento está en función del rango del tamaño del material predecesor y de la energía aplicada durante su traslado desde la roca fuente hasta el sitio de depósito. La energía es dependiente de la velocidad de corriente del medio de transporte (Folk, 1980). En éste caso el medio principal de transporte es el agua que llevan los ríos perennes de la región en trayectos que sobrepasan los 200 km de longitud. Y dado que el tamaño de grano es una medida cuantitativa, éste se obtiene empleando la relación de la ecuación (1) que refleja las variaciones de la distribución granulométrica del material que conforma la playa en dos direcciones ortogonales, a lo largo de la línea de costa y perpendicular a la longitud de cada playa.

$$Mz(\phi) = (\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84}) / 3 \dots\dots\dots (1)$$

La ecuación (2) representa la clasificación sedimentaria, es decir, la mezcla de sedimentos finos, medios y gruesos con granos de cuarzo en cada zona de interés (Fig.3).

$$\sigma_1(\phi) = [(\phi_{84} - \phi_{16})/4 + (\phi_{95} - \phi_5) / 6.6 ] \dots\dots\dots (2)$$

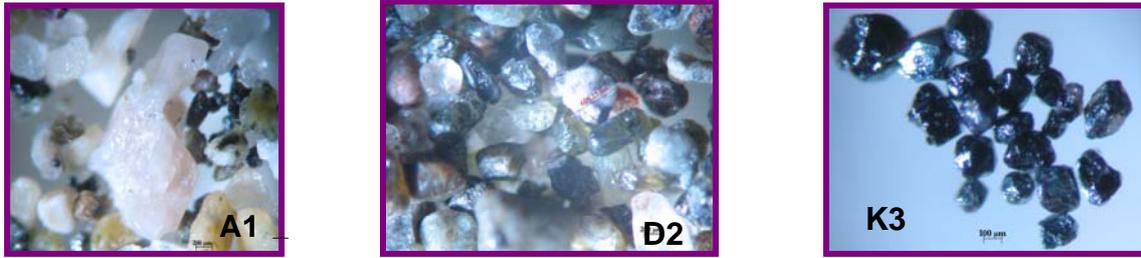


Figura 3. Muestra sedimentaria de los arreglos mineralógicos en las subzonas de playa. Imágenes obtenidas con un microscopio estereoscópico.

El grado de simetría que poseen los clastos en una muestra sedimentaria se obtiene mediante la ecuación (3) e indica que tan simétrica es la distribución del tamaño de grano, es decir si existen variaciones significativas entre el tamaño promedio y los extremos ya sea un sesgo positivo o uno negativo (Tabla 2).

$$Ski = [(\phi_{16} + \phi_{84} - 2\phi_{50}) / 2(\phi_{84} - \phi_{16})] + [(\phi_5 + \phi_{95} - 2\phi_{50}) / 2(\phi_{95} - \phi_5)] \dots (3)$$

Para la determinación del grado de curtosis en las distribuciones del tamaño de grano se emplea la ecuación de Folk (1980) (ecuación 4). Ésta representa una medida de la forma de la cima de la distribución gráfica (Tabla 2) donde se cuantifica la desviación de la normalidad (curva gaussiana) que tiene el tamaño de grano ( $Mz\phi$ ) en la parte central de la curva con sus extremos.

$$K_G = (\phi_{95} - \phi_5) / [2.44 (\phi_{75} - \phi_{25})] \dots (4)$$

### Petrología

En el presente estudio se procedió a determinar la petrología de las arenas mediante un conteo de 300 puntos/muestra normalizado al 100%. Los cuales se agruparon en base al cuarzo total

( $Q_t$ ), contenido de feldespatos totales ( $F_t$ ) que incluyen a los feldespatos potásicos ( $F_k$ ) y las plagioclasas ( $P$ ), y líticos totales ( $L_t$ ), (Tabla 2, Fig. 12) que es integrada por la suma de los líticos volcánicos ( $L_v$ ) + líticos sedimentarios ( $L_s$ ) + líticos metamórfico ( $L_m$ ) + líticos plutónicos ( $L_p$ ) y se incluyen minerales pesados ( $MP$ ). Los análisis de composición petrológica en sedimentos recientes (sedimentos de playa) son empleados como indicadores de madurez y procedencia (Pettijohn, 1975; Basu, 1976; Basu y Molinaroli, 1989; Kasper-Zubillaga *et al.*, 2006) y se consideran excelentes indicadores de asociaciones climáticas (Grantham y Velbel, 1987). Se obtuvo el índice de madurez ( $I_M$ ) y el índice de procedencia ( $I_P$ ) mediante las ecuaciones 5 y 6 respectivamente (Tabla 3), estos índices fueron establecidos por Pettijohn en el año de 1975.

$$I_M = Q_t / (F_t + L_t) \dots\dots\dots(5)$$

$$I_P = F_t / L_t \dots\dots\dots(6)$$

donde:  $Q_t = Q_m + Q_p$  ;

$$F_t = F_k + P ;$$

$$L_t = L_v + L_s + L_p + L_m$$

### **Geoquímica**

Con el objeto de determinar la variabilidad de la composición química que presentan las 33 muestras totales en el laboratorio de sedimentología del ICMYL se cuantificaron once elementos traza (Tabla 4 y Fig. 14) de cada muestra mediante un espectrómetro de fluorescencia de rayos X marca SIEMENS equipado con una ventana de rodio y una delgada ventana de berilio de 125  $\mu m$ .

Para tener información sobre la composición química de las arenas, se determinó con el espectrómetro de fluorescencia de rayos X se determinó la composición química de las

muestras (muestras totales) pesando un gramo de masa de cada muestra, se molió y fundió en una mezcla de nueve gramos de tetraborato de litio ( $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ) y borato de litio ( $\text{LiBO}_2$ ), [1:1  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ :  $\text{LiBO}_2$ ] y se analizaron las concentraciones de óxidos de elementos en % de peso (Tabla 8, Fig. 19).

Para obtener el índice de alteración química (IQA) (Nesbitt & Young, 1982) en muestra total se empleó la ecuación (7) la cual representa el grado de desgaste que han tenido los sedimentos de arenas desde la roca fuente hasta el momento de su colección.

$$\text{IQA} = [ \text{Al}_2\text{O}_3 / ( \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} ) ] [100] \dots\dots\dots(7)$$

donde: CaO = cantidad de CaO en la fracción de silicato de la roca.

Otro índice de utilidad en la alteración de los minerales en las arenas es el denominado índice de alteración de plagioclasas (IAP) sugerido por Fedo y colaboradores en 1995 y es calculado mediante la siguiente ecuación.

$$\text{IAP} = [ ( \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{K}_2\text{O} ) / ( \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} - \text{K}_2\text{O} ) ] [100] \dots\dots\dots(8)$$

En el laboratorio de Geomagnetismo y Exploración del Instituto de Geofísica, UNAM mediante un imán de mano se separaron las arenas de cada zona de playa en dos grupos. Los minerales portadores de la magnetización en las rocas se hayan principalmente en los óxidos de Fe y Ti, que son los minerales que presentan valores más altos de susceptibilidad y remanencia magnética. Estos minerales constituyen generalmente un porcentaje bajo del arreglo mineralógico total y forman parte de un arreglo más diverso de diferentes minerales. La separación de las fracciones magnéticas se logró al dispersar la muestra de arenas sobre una hoja de papel bond y pasar por encima de estos un imán de mano previamente cubierto

con plástico para que los minerales magnéticos o con alguna incrustación magnética se adhirieran fácilmente a dicho imán obteniendo concentrados de elementos magnéticos (parte de la muestra adherida al imán de mano) y concentrados de elementos no magnéticos (minerales no adheridos al imán). Se obtuvo el contenido de elementos traza y elementos mayores (en %) en ambos tipos de concentrados (Tabla 6, 7 y 9, Fig. 16 y 17) mediante un analizador de fluorescencia de rayos X marca Thermo Scientific.

### **Geomagnetismo**

Ya que la imantación de un material magnético es proporcional al campo aplicado. El factor de proporcionalidad llamado susceptibilidad magnética  $X$ , está definida por:

$$X = M / H \dots\dots\dots (9)$$

donde M = momento magnético

H = intensidad del campo magnético

Como el momento magnético y la intensidad del campo magnético tienen la misma unidad de medición (Tesla),  $X$  es adimensional sin embargo por convención se reporta en el Sistema Internacional (SI), (Alva-Valdivia, *et al.*, 1993; Hatfiel *et al.*, en prensa).

Es posible determinar la susceptibilidad magnética en altas y bajas frecuencias ( $X_{af}$  y  $X_{bf}$  respectivamente) siendo ésta última la que se emplea para inferir la presencia de magnetita en sedimentos gruesos ( $>1.0 \mu\text{m}$ ) además de estar asociada con arenas y limos (Booth *et al.*, 2005). La susceptibilidad magnética dependiente de la frecuencia ( $X_{df\%}$ ) se ha empleado como un proxy de contenido de arcilla (Zhang, *et al.*, 2001), así como proxy en la cartografía de erosión en playas (Hatfiel, *et al.*, 2010). En 1975 Hossain emplea la susceptibilidad magnética para caracterizar y determinar la procedencia de pirita en arenas de playas.

Con el objeto de estimar la variabilidad litológica en base al magnetismo de los minerales de sedimentos de playa se procedió a medir la susceptibilidad magnética en el laboratorio de Geomagnetismo y Exploración del Instituto de Geofísica, UNAM para lo cual primeramente con una balanza de precisión marca Citizen modelo CS120 se obtuvo el peso de cada cubo de acrílico sin muestra y el peso de éste con muestra de sedimentos en un volumen de 8 cm<sup>3</sup>/muestra. En un susceptibilímetro MS2B de doble frecuencia Bartington debidamente calibrado con una masa estándar para calibración magnética la cual está en unidades cgs (10 cc "Calibración simple", 294X10<sup>-6</sup> cgs a 20° C) y con un sensor cilíndrico de 36 mm de diámetro (Fig. 4a) se introduce la muestra total que yace en cada cubo de acrílico para ser caracterizada en alta y baja frecuencia (4.65 y 0.465 kHz respectivamente).

Se procedió al registro de la variable en tres ocasiones por muestra y se obtiene un promedio para tener mayor certeza en los resultados. Se determinó la susceptibilidad magnética en muestra total y ambos tipos de concentrados magnéticos (Tabla 10).



Figura 4a) Susceptibilímetro MS2B.



4b) Magnetómetro MOLSPIN.

La Magnetización Remante Natural (MRN) es un parámetro vectorial que involucra la suma de todas las diferentes magnetizaciones primarias y secundarias (detrital, química, viscosa, isotérmica, etc.) que coexisten en un cuerpo rocoso. Es dependiente del campo geomagnético,

de la composición química, estructura cristalina y tamaño de los minerales en la roca (Logachev y Zajarov, 1978; Urrutia-Fucugauchi, *et al.*, 1997). Se adquiere durante la formación de las rocas (Butler, 1992). Dicha propiedad es estable en escalas temporales cortas de decenas a centenas de años, pero no en el tiempo geológico (Logachev y Zajarov, 1978). Constituye una evidencia sobre los cambios que ha tenido el campo magnético terrestre a lo largo del tiempo.

La intensidad de la magnetización remanente natural (MRN) en los concentrados magnéticos (Tabla 10) fue caracterizada mediante un magnetómetro rotativo de discriminación de flujo tipo MOLSPIN (Fig. 4b) del Laboratorio de Paleocanografía Instituto de Geofísica, UNAM.

## 6. CARACTERÍSTICA TEXTURAL

Los estudios texturales y granulométricos permiten investigar las fuentes, transporte y procesos de depósito y dinámica en la costa. La granulometría en una playa forma parte de los atributos que la identifican como atractivo turístico (Enríquez-Hernández, 2003; Nachite *et al.*, 2005). Para conocer con mayor detalle las características mineralógicas de los sedimentos de playa, el grado de intemperismo y abundancia relativa de minerales magnéticos se cuenta con análisis de parámetros texturales: tamaño gráfico promedio ( $Mz\phi$ ), desviación gráfica inclusiva ( $\sigma_1\phi$ ), asimetría ( $Ski$ ), curtosis gráfica ( $K_G$ ), así como la abundancia de los elementos traza, los elementos mayores y análisis modales.

Los parámetros texturales de los sedimentos de las playas (Tabla 2) son de utilidad, pues generalmente en las fracciones más finas es donde hay una mayor concentración de minerales pesados y se reflejan las condiciones ambientales predominantes de una región dada (Visher, 1969; Sly, *et al.*, 1983; Prothero y Schwab, 1999; Mange y Otvos, 2005). La desviación gráfica inclusiva o coeficiente de clasificación forma parte de los parámetros texturales y se basa en el rango del tamaño de los sedimentos depositados. Mediante la cuantificación de tamaño de grano se infiere el grado (alto, bajo, medio) de intemperismo que tiene determinado material, el tipo de depósito o la dispersión de los mismos, además del tipo de corriente continua o estacional (corrientes continuas altas o bajas generan mejor clasificación sedimentaria que las corrientes que fluctúan) que actúa sobre estos. El ritmo de aporte de detritos es comparado con la eficiencia del agente clasificador (Folk, 1980) y permite estimar las variaciones en la velocidad de flujo durante los procesos de transporte y depósito.

### 6.1 Tamaño gráfico promedio

De acuerdo con la clasificación de Folk (1980) en las tres subzonas de cada playa analizada predominan las arenas de tamaño medio (Tabla 2, Fig. 5). Las arenas finas dominan en la

zona de la infraplaya en G, mientras que en la zona de mesoplaya de G, H y J al igual que en la zona de supraplaya de K hay arenas con  $Mz(\phi)$  superior a 2.00 ( $\phi$ ), es decir, los sedimentos que alimentan la zona oriental de las playas de Colima se intemperizan con mayor energía que en el resto de las arenas de las playas adyacentes en tal forma que, se tienen sedimentos más finos y de colores más oscuros (negro) en el sector de la cuenca Coahuayana (Fig. 5). El volumen medio anual de escurrimiento en las cuencas de los ríos Armería y Coahuayana rebasa 500 millones de  $m^3$  anuales, contribuyendo a la erosión, transporte y depósito de sedimentos hacia el ambiente de playa. En contraste, las subzonas de las playas AS, BM, BS, y las tres subzonas de la playa C exhiben sedimentos con colores más claros (blanco y ocre) correspondiendo con arenas gruesas ( $0 < Mz(\phi) < 1$ ) donde el río Cihuatlán es poco caudaloso y el almacenamiento de agua es pobre. Esos tamaños de clastos relativamente más grandes en B, C y D posiblemente se deba a que se trata de playas protegidas del oleaje (no son playas con oleaje expuesto al mar abierto). Hacia el sureste se observa un decremento en el tamaño de grano y por lo mismo cambia el color (de ocre a negro) de las arenas debido a cambios composicionales en la misma dirección preferencial (Fig. 5).

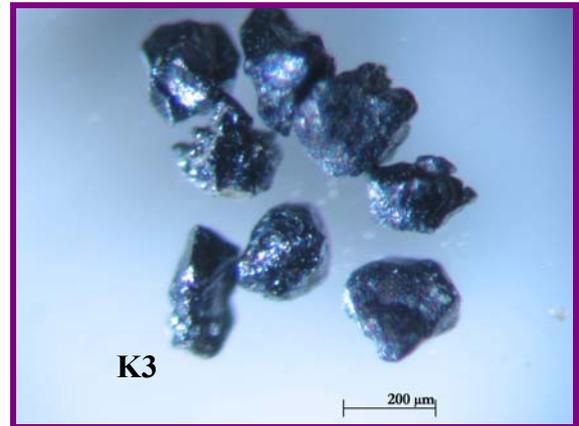
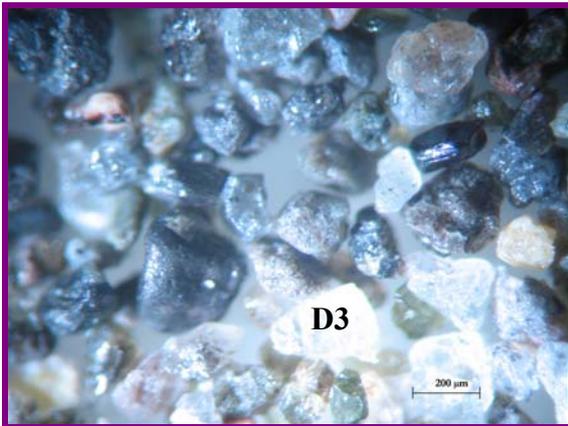


Figura. 5. Arenas en las diferentes subzonas de playa.

Tabla 2. Parámetros texturales y petrológicos (tomada de Carranza-Edwards *et al.*, 2009).

Muestra	Mz( $\phi$ )	$\sigma$ ( $\phi$ )	Ski	K <sub>G</sub>	Qm	Qp	Q <sub>t</sub>	F <sub>t</sub>	Lv	Ls	Lm	Lp	L <sub>t</sub>	MP
AI	1.81	0.49	0.12	1.17	22.0	3.8	25.8	13.8	9.0	0.6	2.5	36.0	48.1	12.3
AM	1.81	0.51	0.02	1.05	27.0	2.0	29.0	28.0	13.0	1.0	1.0	15.0	30.0	13.0
AS	0.57	0.85	-0.03	0.93	27.0	0.0	27.0	35.0	9.0	7.5	0.0	20.0	36.5	1.5
BI	1.81	0.57	0.14	1.05	14.0	0.0	14.0	38.5	3.5	0.0	5.5	19.5	28.5	19.0
BM	0.68	2.21	-0.66	0.48	28.5	0.5	29.0	49.4	1.0	0.0	0.0	5.3	6.3	15.3
BS	0.93	0.65	0.00	1.03	20.0	0.0	20.0	36.5	1.5	1.0	2.5	24.5	29.5	14.0
CI	0.90	0.73	0.05	0.98	5.50	0.0	5.5	16.0	26.0	1.5	6.0	39.0	72.5	6.0
CM	0.96	0.63	-0.04	0.97	11.5	0.0	11.5	19.0	25.0	2.0	0.5	40.0	67.5	2.0
CS	0.27	0.64	0.29	1.07	4.5	0.5	5.0	16.0	13.5	0.0	1.5	63.5	78.5	0.5
DI	1.57	0.60	-0.12	1.29	0.5	0.0	0.5	9.0	61.5	0.5	0.0	4.5	66.5	24.0
DM	1.63	0.47	0.02	1.07	2.0	0.0	2.0	12.0	58.0	0.0	0.0	9.0	67.0	19.0
DS	1.81	0.41	0.03	1.11	1.5	0.0	1.5	40.0	46.5	0.5	0.5	0.0	47.5	11.0
EI	1.30	0.48	0.04	1.00	1.5	0.0	1.5	7.5	67.5	0.0	0.0	2.0	69.5	21.5
EM	1.28	0.46	0.09	1.06	2.0	0.0	2.0	10.0	73.0	2.0	0.0	1.0	76.0	12.0
ES	1.45	0.61	-0.09	1.08	2.0	0.0	2.0	31.0	65.0	0.0	0.0	0.0	65.0	2.0
FI	1.60	0.54	-0.08	1.12	5.0	0.0	5.0	12.0	77.0	0.0	0.0	0.0	77.0	6.0
FM	1.24	0.63	0.10	0.90	12.5	2.0	14.5	10.0	60.5	0.0	0.0	6.0	66.5	9.0
FS	1.74	0.55	0.03	1.04	20.0	2.0	22.0	15.0	44.0	0.0	0.0	4.0	48.0	15.0
GI	2.13	0.49	-0.01	1.03	13.5	1.5	15.0	17.5	41.5	0.0	0.0	2.0	43.5	24.0
GM	2.27	0.44	0.01	1.08	8.5	2.0	10.5	19.0	51.5	0.0	0.0	0.0	51.5	19.0
GS	1.62	0.73	0.14	0.93	8.0	1.0	9.0	14.5	63.0	0.0	0.0	1.0	64.0	12.5
HI	1.70	0.52	0.12	1.05	16.0	2.5	18.5	24.0	29.0	1.5	0.0	11.0	41.5	16.0
HM	2.07	0.56	0.05	0.97	19.0	4.0	23.0	14.5	21.5	1.0	0.0	9.0	31.5	31.0
HS	1.31	0.67	-0.06	1.09	10.0	3.5	13.5	9.0	30.0	2.0	0.0	7.5	39.5	38.0
II	1.69	0.47	0.13	1.15	3.0	1.50	4.5	6.0	17.5	0.0	3.5	12.5	33.5	56.0
IM	1.49	0.44	0.17	1.20	3.5	0.0	3.5	4.0	53.5	0.0	0.0	4.0	57.5	35.0
IS	1.57	0.56	0.08	1.08	2.0	1.0	3.0	19.5	27.5	0.0	4.0	7.0	38.5	39.0
JI	1.88	0.59	0.12	1.04	4.0	0.0	4.0	9.5	27.0	1.0	3.5	6.0	37.5	49.0
JM	2.27	0.55	0.07	1.02	8.0	0.0	8.0	15.0	25.0	4.0	0.0	1.5	30.5	46.5
JS	1.52	0.53	0.02	1.05	6.5	0.0	6.5	14.0	39.0	5.0	0.0	2.5	46.5	33.0
KI	1.79	0.55	0.06	1.05	16.0	5.0	21.0	15.0	19.0	6.0	1.5	1.5	28.0	36.0
KM	1.60	0.66	0.01	1.01	10.0	4.0	14.0	18.5	21.5	2.0	4.0	0.0	27.5	40.0
KS	2.26	0.62	0.02	0.99	15.5	6.0	21.5	21.5	15.0	3.5	3.5	0.0	22.0	35.0
Prom.	1.53	0.62	0.03	1.03	10.6	1.3	11.9	18.8	34.4	1.3	1.2	10.7	47.7	21.6

El siguiente diagrama (Fig. 6) muestra como los mecanismos erosivos del viento, las mareas y sobre todo el flujo de los ríos que dominan en la región han llegado a depositar y erosionar sedimentos con tamaño de grano promedio variado e integran playas con diferentes características granulométricas que se ubican dentro de tres grupos principales en los cuales dominan las arenas medianas.

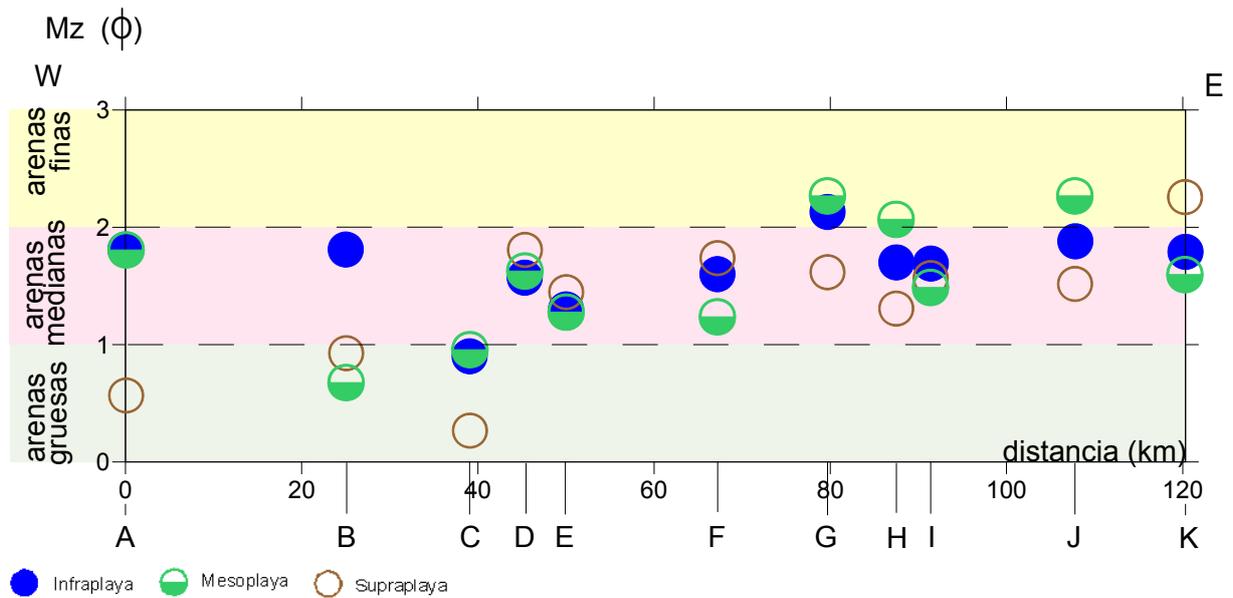


Figura 6. Tamaño gráfico promedio  $Mz(\phi)$  (modificada de Carranza-Edwards *et al.*, 2009).

La distribución de frecuencia acumulativa (Fig. 7) en cada zona de playa representa una función logarítmica donde la variabilidad granulométrica sedimentaria se interpreta como sedimento grueso con menor grado de intemperismo en la curva de supraplaya (ocre) y mayor intemperismo en la curva de infraplaya (azul) por consiguiente un tamaño de grano menor.

La distribución que el tamaño de grano presente indica que la clasificación comienza a mejorar conforme el valor de  $Mz(\phi)$  aumenta, ésta tendencia puede asociarse con el ancho de playa (promedio de 53m entre las zonas de infraplaya y las zonas de supraplaya) y puede contribuir a la clasificación de éstos sedimentos.

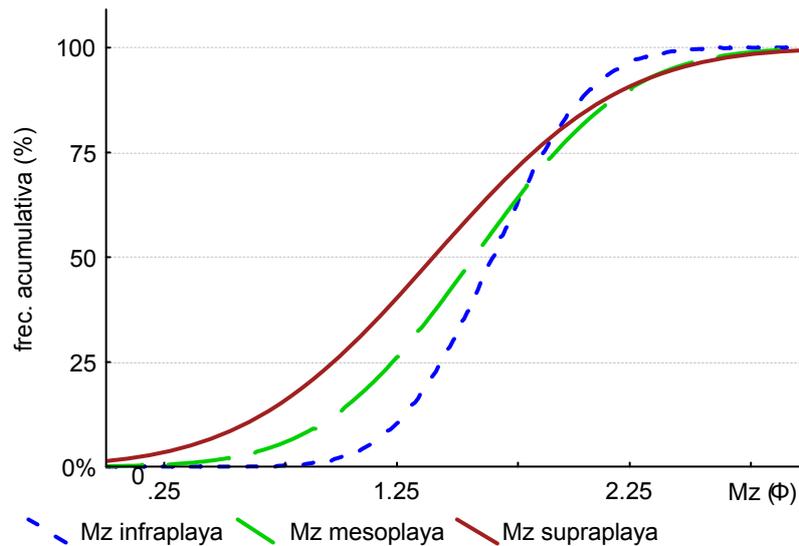


Figura 7. Frecuencia acumulativa de  $Mz(\phi)$ , (elaborada con datos de Carranza-Edwards *et al.*, 2009).

## 6.2 Desviación gráfica inclusiva

Los procesos como la erosión, el viento, el transporte fluvial, el oleaje y las corrientes litorales son procesos selectivos por ello en el ambiente de playa se presenta una tendencia a que las arenas estén más o menos bien clasificadas.

En particular en los sedimentos litorales del estado de Colima existe una fuerte influencia del oleaje y de un transporte litoral dominante con dirección sureste-noroeste, observándose que en los sitios muestreados existe una predominancia de sedimentos bien clasificados y de sedimentos moderadamente bien clasificados, principalmente en las zonas de mesoplaya de las playas de la cuenca de los ríos Armería y Coahuayana (Fig. 8) donde dichos sedimentos desde su origen hasta la zona de depósito recorren un trayecto más largo que los sedimentos de la cuenca del río Cihuatlán, donde además hay litoral rocoso y bahías. Se infiere una corriente fluvial deposicional continua en las primeras dos cuencas. La playa B en su zona de mesoplaya tiene un valor de  $\sigma_1(\phi) = 2.21(\phi)$  e identifica a ésta como una zona con sedimentos muy mal clasificados, es decir, no existe un tamaño de grano predominante ya que se presentan arenas medias, gruesas y finas sin preservar orden alguno y es correspondiente

con el caudal y almacenamiento de agua escaso de la cuenca Cihuatlán (la que alberga a la playa B). Para AS, CI, GS se tienen valores de  $\sigma_1(\phi) = 0.85(\phi)$ ,  $0.73(\phi)$  y  $0.73(\phi)$  respectivamente y presentan sedimentos moderadamente clasificados.

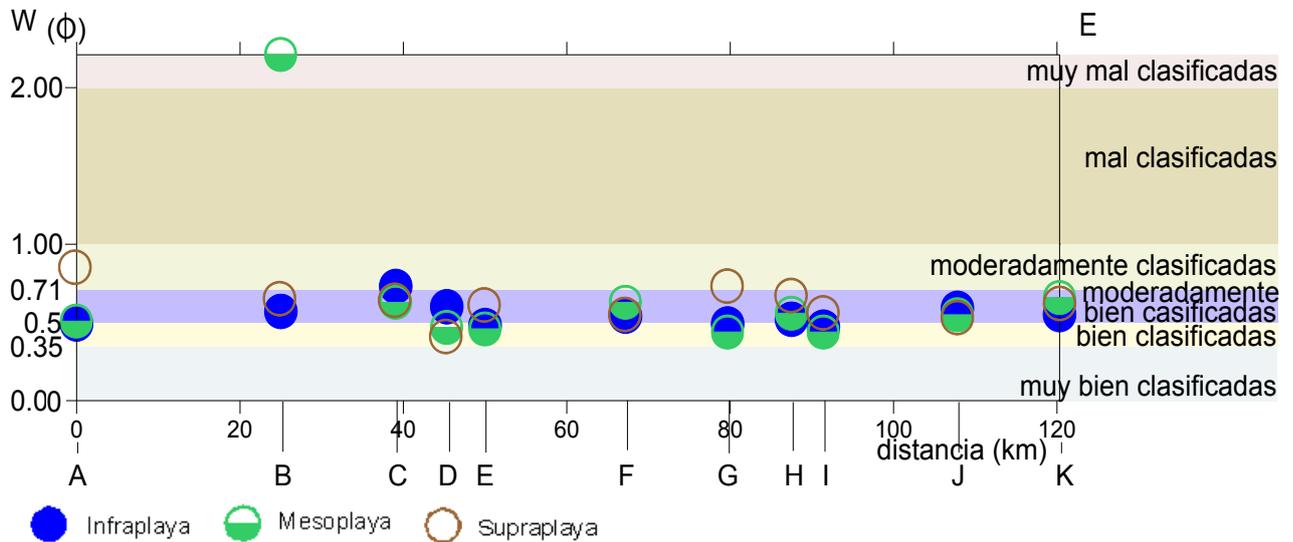


Figura 8. Desviación gráfica inclusiva ( $\sigma_1\phi$ ) (modificada de Carranza-Edwards *et al.*, 2009).

### 6.3 Asimetría

En la figura 9 se aprecia que la mayoría de los sedimentos analizados (70%) presentan una distribución simétrica ( $-0.1 < S_{ki} < 0.1$ ) seguidos por una distribución sesgada hacia los sedimentos finos (24%) y solo un 3% de los datos (con  $S_{ki} = -0.66$  en la muestra BM) se sesgan al extremo izquierdo de la normal o están fuertemente sesgados hacia los sedimentos gruesos, ésta contribución se debe principalmente al aporte granulométrico de las playa A y B (en su zona de supraplaya).

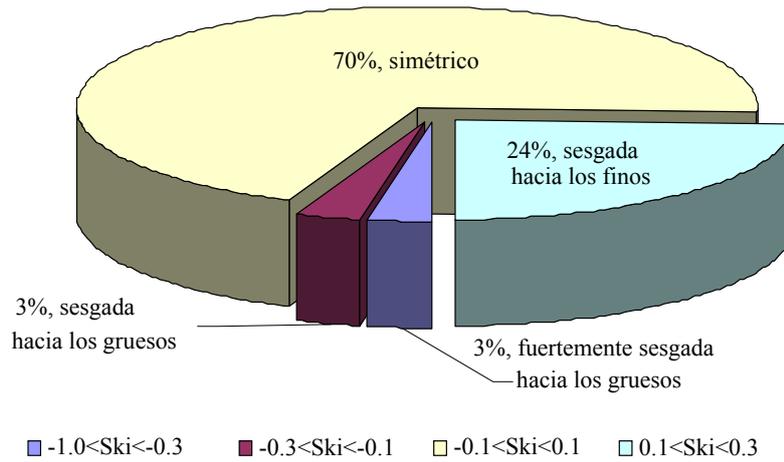


Figura 9. Asimetría ( $S_{ki}$ ). Elaborada con datos de Carranza-Edwards *et al.*, 2009.

#### 6.4 Curtosis

No existen diferencias significativas en la clasificación sedimentaria siendo el 79% de los datos quienes se ubican dentro de una distribución mesocúrtica ( $0.9 < K_G < 1.11$ ). Arenas con mayor enriquecimiento de cuarzo que feldespato pueden reflejar una distribución cerrada producto de rocas fuentes terrígenas. Solo un 15% de estos tiene mejor clasificación que sus extremos, generando una distribución leptocúrtica y tan solo el 3% corresponde a distribuciones platicúrticas o muy platicúrticas (Fig. 10).

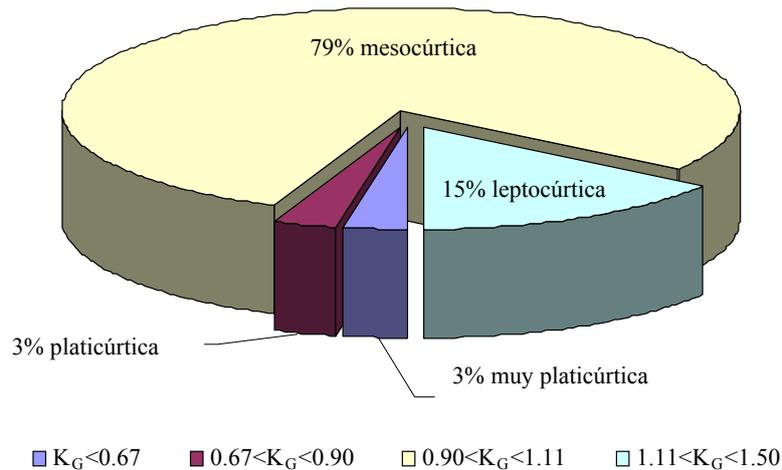


Figura 10. Curtosis ( $K_G$ ). Elaborada con datos de Carranza-Edwards *et al.*, 2009.

## 7. CARACTERÍSTICA COMPOSICIONAL

### 7.1 Petrología

Grantham y Velbel (1987) consideran que los análisis de fragmentos de rocas son buenos indicadores de clima. La concentración de clastos líticos de origen volcánico indica un primer dominio que rebasa el 40% de abundancia en el conteo de puntos hasta alcanzar un 77% en la zona de infraplaya de la playa F. Además las playas E y F contienen sedimentos que de acuerdo con su tamaño son identificadas como arenas de grano fino ( $1\phi < Mz(\phi) < 2\phi$ ), ambas playas pertenecen a la cuenca del río Armería y concuerda con el recorrido de 294 km que realizan los sedimentos en el río del mismo nombre ya que éste serpentea sobre terrenos volcánicos y calcáreos. El promedio de contenido de fragmentos líticos en las tres cuencas disminuye hacia el sureste. El enriquecimiento de fragmentos líticos es característico de zonas de margen activo y concuerda con la actividad sísmica de la región.

En el segundo dominio están los minerales pesados (MP) cuyas mayores abundancias se ubican por encima del 50% del total, se localizan en la infraplaya de I y J además en la mesoplaya de J, en la supraplaya de H, I, J y K donde estas últimas cuatro no superan el 40% de su contenido de MP (Fig. 11). Éstos minerales pesados también tienden a concentrarse en dirección Este haciendo que las playas de la cuenca del río Coahuayana sean más ricas en minerales pesados que las del río Armería.

En el tercer dominio se haya el contenido de feldespatos que a diferencia de los otros dos dominios éste se incrementa en dirección Oeste. La playa B es la de mayor abundancia en feldespatos y por ello hay una correlación negativa entre los dos últimos dominios, es decir, cuando es mayor la abundancia de feldespatos en una zona de depósito, menor es el contenido de MP en la misma.

El patrón de decremento en la concentración de MP está asociado con el incremento del tamaño de grano y la mejor clasificación sedimentaria. Granos de tamaño finos representa enriquecimiento de MP y granos gruesos contienen minerales ligeros (claros) en una correlación de  $r = 0.52$  de MP vs. Mz ( $\phi$ ). De forma similar que los feldespatos el contenido de cuarzo metamórfico tiende a decrecer hacia el Este, principalmente en la zona de infraplaya de la playa boca de Pascuales lo cual concuerda con las concentraciones que en la naturaleza se presentan. Entre mayor sea el contenido de cuarzo, menor es el contenido de minerales pesados en una zona además de estar íntima y positivamente correlacionados el contenido de minerales pesados con el tamaño de grano en  $r = 0.52$ .

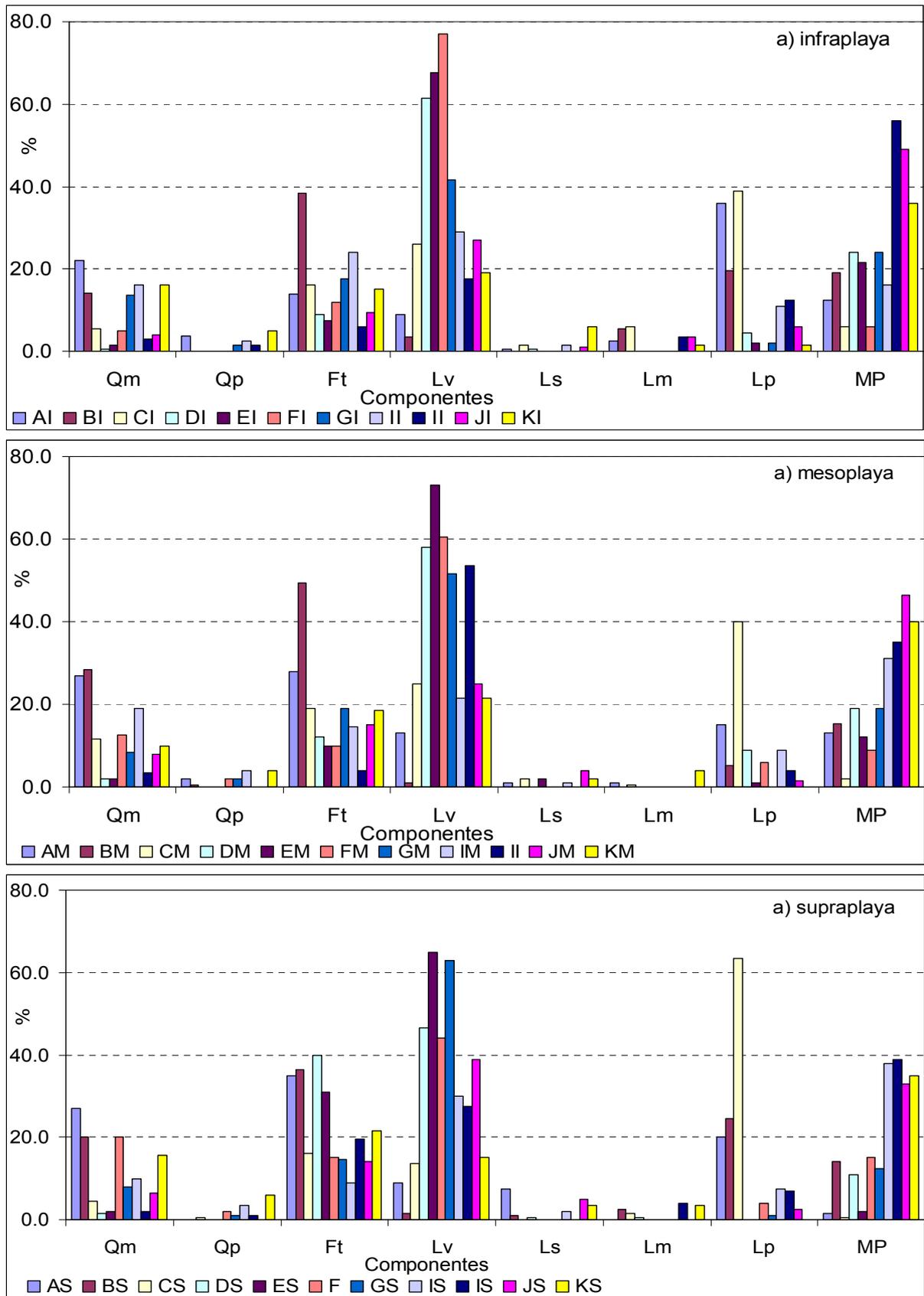


Figura 11. Componentes mineralógicos (modificada de Carranza-Edwards *et al.*, 2009).

En el presente estudio se observa como el contenido de fragmentos de roca es elevado (desde un 20% hasta un 78% con excepción de la muestra BM que apenas alcanza un 6.3 %). Las playas de la cuenca del río Armería tienen predominancia de líticos volcánicos e incluso llegan al 77% de su composición en la zona de infraplaya de F y son los líticos plutónicos los que dominan las otras dos cuencas. Se infiere una roca fuente ígnea diferente para cada cuenca. Las figuras 11 y 12 identifican a la gran mayoría de los sedimentos como arenas líticas y solo un pequeño porcentaje de éstos se desplazan hacia el polo de feldespatos, además se observa que la contribución de líticos sedimentarios y los líticos metamórficos es muy escasa posiblemente a su baja resistencia a la degradación física y química además de no existir abundantes cuerpos de rocas sedimentarias en la región.

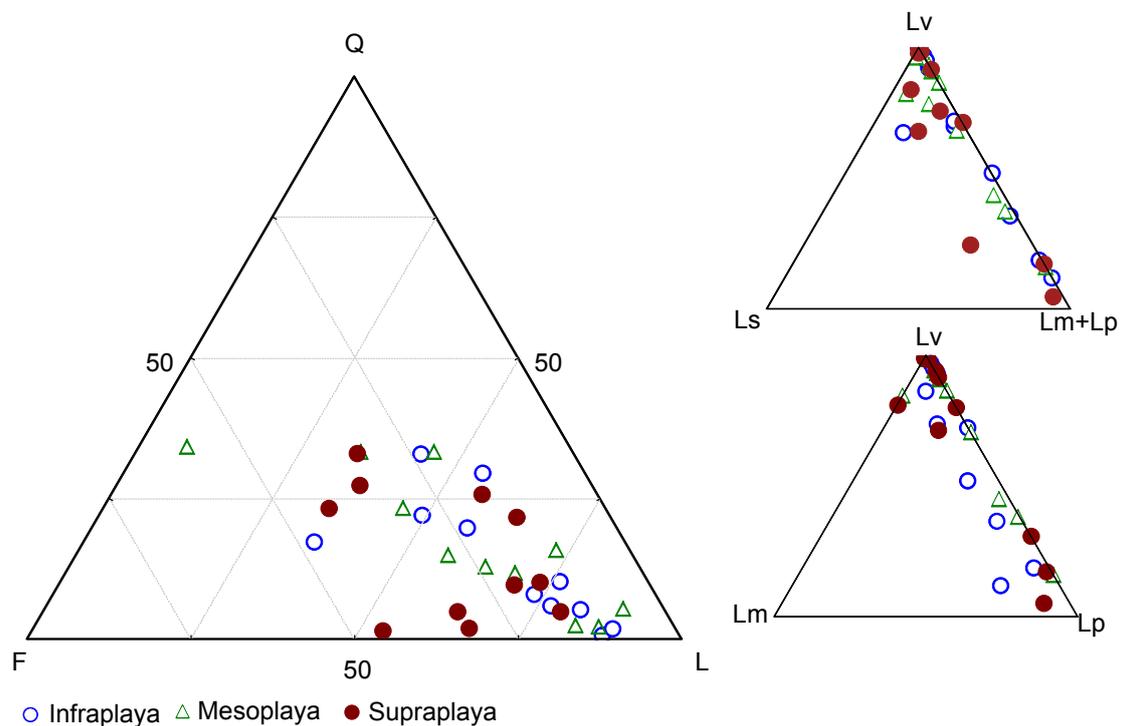


Figura 12. Composición petrológica de las arenas de playa de Colima.

Con los datos petrológicos es posible obtener el índice de madurez ( $I_M$ ) e índice de procedencia ( $I_P$ ) (Tabla 3). En casos donde la roca fuente se encuentra alejada de la zona de depósito se tendrá una madurez elevada (Pettijohn, 1975). Tanto el  $I_M$  como el  $I_P$  de las once playas son relativamente bajos y diferentes los promedios entre cada cuenca. De acuerdo con Pettijohn, (1975) y Carranza-Edwards y Rosales-Hoz (1995) estas relaciones se pueden concentrar dentro de un grupo como elementos de baja madurez, es decir, con roca fuente cercana a la zona de depósito y con una procedencia influenciada por rocas volcánicas. La gráfica  $I_P$  vs.  $I_M$  (Fig. 13) muestra una madurez baja que a su vez es característica de zonas con margen activo, así mismo refleja una procedencia supracortical ya que está influenciada por rocas volcánicas.

Tabla 3. Índice de madurez ( $I_M$ ) e índice de procedencia ( $I_P$ ), (elaborada con datos de Carranza-Edwards *et al.*, 2009).

Muestra	Infraplaya		Mesoplaya		Supraplaya	
	$Q_t/(F_t+FR)$	$F_t/FR$	$Q_t/(F_t+FR)$	$F_t/FR$	$Q_t/(F_t+FR)$	$F_t/FR$
A	0.42	0.29	0.50	0.93	0.38	0.96
B	0.21	1.35	0.52	7.84	0.30	1.24
C	0.06	0.22	0.13	0.28	0.05	0.20
D	0.01	0.14	0.03	0.18	0.02	0.84
E	0.02	0.11	0.02	0.13	0.02	0.48
F	0.06	0.16	0.19	0.15	0.35	0.31
G	0.25	0.40	0.15	0.37	0.11	0.23
H	0.28	0.58	0.50	0.46	0.28	0.23
I	0.11	0.18	0.06	0.07	0.05	0.51
J	0.09	0.25	0.18	0.49	0.11	0.30
K	0.49	0.54	0.30	0.67	0.49	0.98

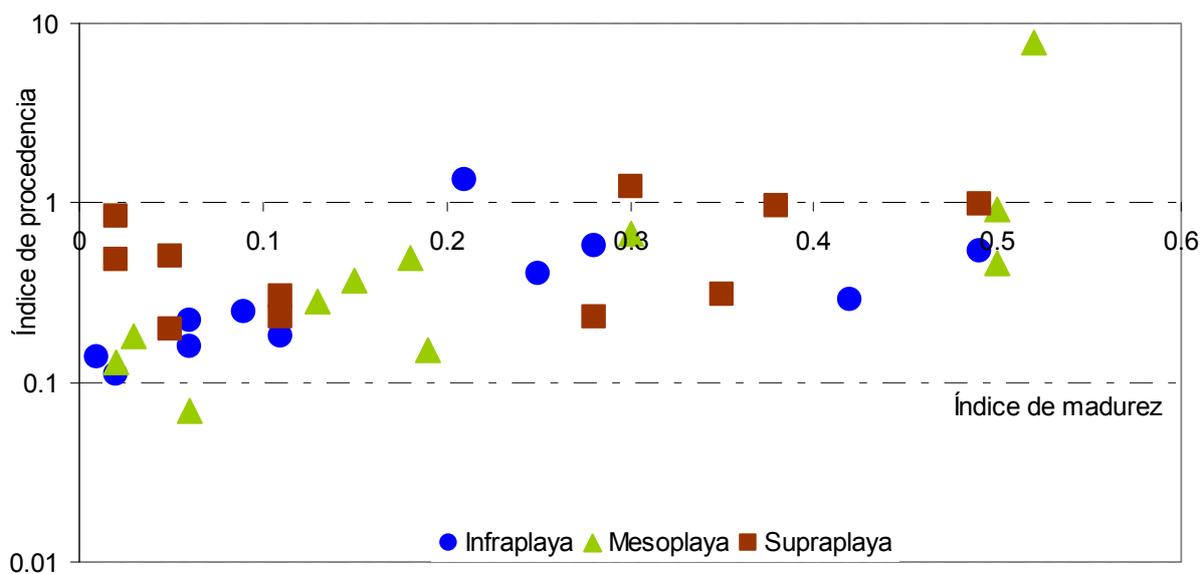


Figura 13. Índice de madurez ( $I_M$ ) vs. Índice de procedencia ( $I_P$ ), (elaborada con datos de Carranza-Edwards *et al.*, 2009).

## 7.2 Geoquímica

Los fragmentos de roca son considerados los elementos más sensibles al intemperismo químico (Grantham y Velbel, 1987). Los cambios físicos y químicos son largos y dependen del tiempo transcurrido entre la erosión del material original y su depósito. Algunos elementos traza (elementos presentes en una proporción menor que el 0.1% del nivel de sus concentraciones expresadas en partes por millón (ppm) e incluso esporádicamente en partes por billón (ppb) del elemento) se concentran en arcillas y en la fracción del mineral pesado mientras que otros se dispersan en la fracción rica en cuarzo.

En el presente estudio se observa como el Ba, Zr, Cr y Co rebasan los promedios de la composición de la corteza continental (Tabla 4, Fig. 14) (Taylor y Mc Lennan, 1985). En muestras totales se observa que el Ba excede las 1000 ppm en BS y CS además de ser el elemento traza de mayor promedio registrado con 590 ppm.

Las concentraciones de Sr a lo largo de toda la costa dominan en dirección noroeste principalmente en las zonas de supraplaya de B y C con 976 y 820 ppm respectivamente y

guardan una correlación positiva entre estos dos elementos traza. Para el cromo se tiene una variación aparentemente creciente en dirección sureste y sus concentraciones tienen un amplio rango, desde 23 ppm en la localidad AS hasta un máximo de 681 ppm en las arenas de la infraplaya de I y un promedio de 189 ppm. El cobalto no presentan una tendencia definida y en promedio su presencia es de 45 ppm. El contenido de Rb oscila entre 6 y 74 ppm con una tendencia general de decremento en dirección sureste. En la tabla 4 se observa que cuando las concentraciones de Sr y Ba son altas, entonces las concentraciones de Cr, Co y V son bajas.

Tabla 4. Elementos traza (ppm) en muestra total, (tomada de Carranza-Edwards *et al.*, 2009).

Muestra	Rb	Sr	Ba	Y	Zr	Nb	V	Cr	Co	Ni	Cu
AI	46	502	627	18	159	22	73	36	47	45	32
AM	56	533	733	15	141	19	54	34	49	44	34
AS	74	560	979	12	146	11	30	23	28	35	46
BI	36	862	864	15	162	11	82	35	42	69	35
BM	35	829	780	18	188	16	92	44	54	70	27
BS	49	976	1139	12	179	11	64	29	28	66	51
CI	51	749	968	14	146	11	73	43	34	56	41
CM	52	754	995	13	147	09	71	41	21	55	76
CS	65	820	1159	11	156	10	42	25	28	52	52
DI	26	554	553	15	156	10	144	180	42	81	36
DM	21	528	447	15	127	10	161	165	33	65	22
DS	18	601	548	13	152	13	156	220	63	89	27
EI	23	720	668	15	186	11	141	129	57	83	37
EM	17	514	446	14	121	11	172	213	33	77	23
ES	16	495	494	13	139	07	171	286	51	91	28
FI	26	796	743	14	192	12	123	87	47	81	38
FM	27	802	765	15	200	11	127	66	36	76	44
FS	20	642	597	13	160	10	149	175	44	92	29
GI	23	757	646	13	173	10	135	105	41	84	38
GM	19	608	428	13	119	08	153	133	30	62	23
GS	20	601	594	13	157	09	154	191	47	83	34
HI	27	752	695	14	184	11	121	88	40	80	45
HM	15	475	423	14	128	09	214	266	46	88	25
HS	17	485	492	13	138	07	196	251	42	83	31
II	6	169	127	13	73	06	365	681	68	86	05
IM	15	380	354	13	90	09	177	290	37	100	16
IS	19	412	411	14	122	07	182	266	44	79	26
JI	9	277	255	13	73	08	237	406	41	121	35
JM	7	217	129	16	173	11	512	659	103	76	05
JS	17	350	341	15	125	10	282	353	68	75	17
KI	22	492	440	15	138	08	175	179	47	75	32
KM	21	419	397	15	147	07	226	175	29	60	74
KS	14	309	220	19	211	11	615	372	67	64	06

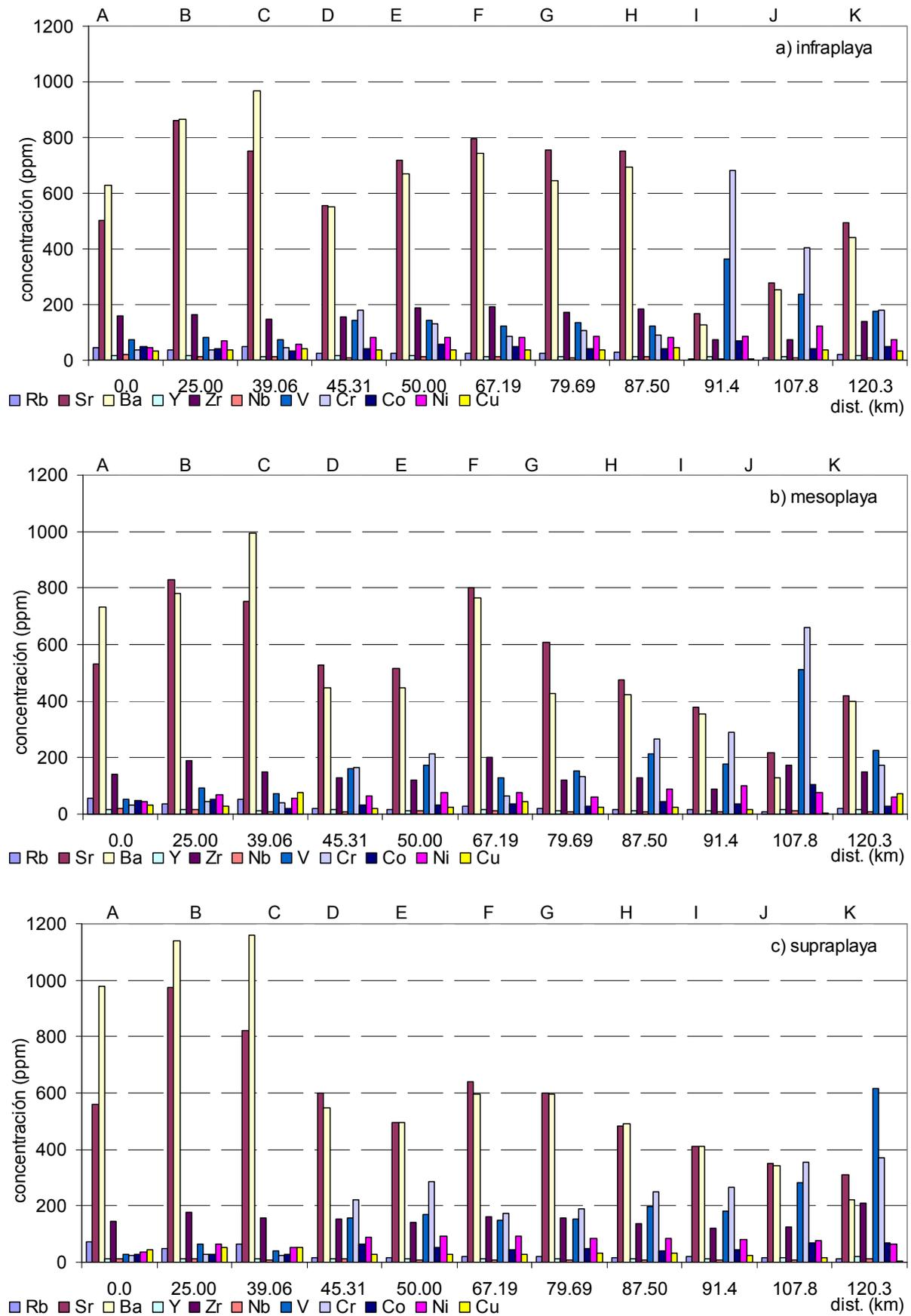
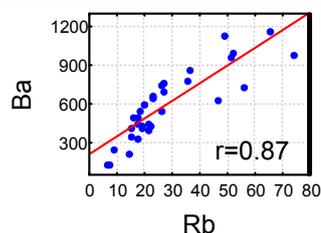


Figura 14. Elementos traza en muestra total, (elaborada con datos de Carranza-Edwards *et al.*, 2009).

Existe un bajo contenido de Ni, lo que es muy común en rocas volcánicas y de Zr (alrededor de 100 ppm) en toda la costa. La sola presencia de este último hace suponer la existencia de zircones como parte del depósito de arenas. En la zona de KS se tiene la concentración más elevada de dicho elemento traza con 211 ppm. Los otros elementos traza muestran valores de bajos a muy bajos. La matriz de correlación múltiple (Tabla 5) muestra una correlación positiva  $>0.70$  entre Rb-Ba, Sr-Ba, V-Cr, V-Co, y Cr-Co.

Tabla 5. Correlación de elementos traza en muestra total.

	Rb	Sr	Ba	Y	Zr	Nb	V	Cr	Co	Ni	Cu
Rb	1.00										
Sr	<b>0.57</b>	1.00									
Ba	<b>0.87</b>	<b>0.88</b>	1.00								
Y	-0.17	-0.20	-0.31	1.00							
Zr	0.26	<b>0.58</b>	<b>0.43</b>	<b>0.41</b>	1.00						
Nb	<b>0.46</b>	0.26	0.32	<b>0.51</b>	<b>0.40</b>	1.00					
V	-0.67	-0.72	-0.78	<b>0.41</b>	-0.03	-0.29	1.00				
Cr	-0.74	-0.84	-0.84	0.08	-0.44	-0.43	<b>0.83</b>	1.00			
Co	-0.50	-0.52	-0.58	<b>0.45</b>	0.11	0.12	<b>0.71</b>	<b>0.71</b>	1.00		
Ni	-0.77	-0.28	-0.52	-0.19	-0.31	-0.46	0.29	<b>0.52</b>	0.26	1.00	
Cu	<b>0.58</b>	<b>0.58</b>	<b>0.68</b>	-0.32	0.23	-0.01	-0.62	-0.67	-0.69	-0.34	1.00



Con el objeto de establecer el grado de asociación entre las variables analizadas se realiza la matriz de correlación múltiple. Existen varias correlaciones negativas significativas en muestra total de los parámetros sedimentológicos y geoquímicos  $Mz(\phi)$  vs.  $\sigma_1(\phi)$ ,  $Mz(\phi)$  vs.  $Lp$  y  $Mz(\phi)$  vs.  $K_2O$  además de correlaciones positivas de  $Mz(\phi)$  vs.  $MP$ ,  $Mz(\phi)$  vs.  $Fe_2O_3$  y  $Mz(\phi)$  vs.  $IQA$  (Fig. 15). Conforme el tamaño de grano decrece su clasificación mejora siendo la parte sureste la zona que contiene sedimentos más finos y mejor clasificados.

El contenido de líticos plutónicos se correlaciona con las fracciones más gruesas de clastos que dominan en las playas del extremo noroeste de la costa de Colima. Así como el  $K_2O$  es

más abundante en ésta zona. El contenido de minerales pesados (MP) se concentra en la fracción más fina donde la erosión es tal que, preserva los minerales más resistentes derivados de fuentes plutónicas en las cuencas de Cihuatlán y Coahuayana y líticos volcánicos en la zona de Armería. Los óxidos de Fe y Ti también tienden a incrementar su concentración hacia las zonas donde el tamaño de grano es menor y tiene una mejor clasificación. Éste tipo de correlación también puede indicar un grado de erosión alto en el extremo sureste de la costa de Colima como lo demuestra la relación  $Mz(\phi)$  vs. IQA con una  $r = 0.60$  (Fig. 15), conforme crece  $Mz(\phi)$  también crece el valor del IQA.

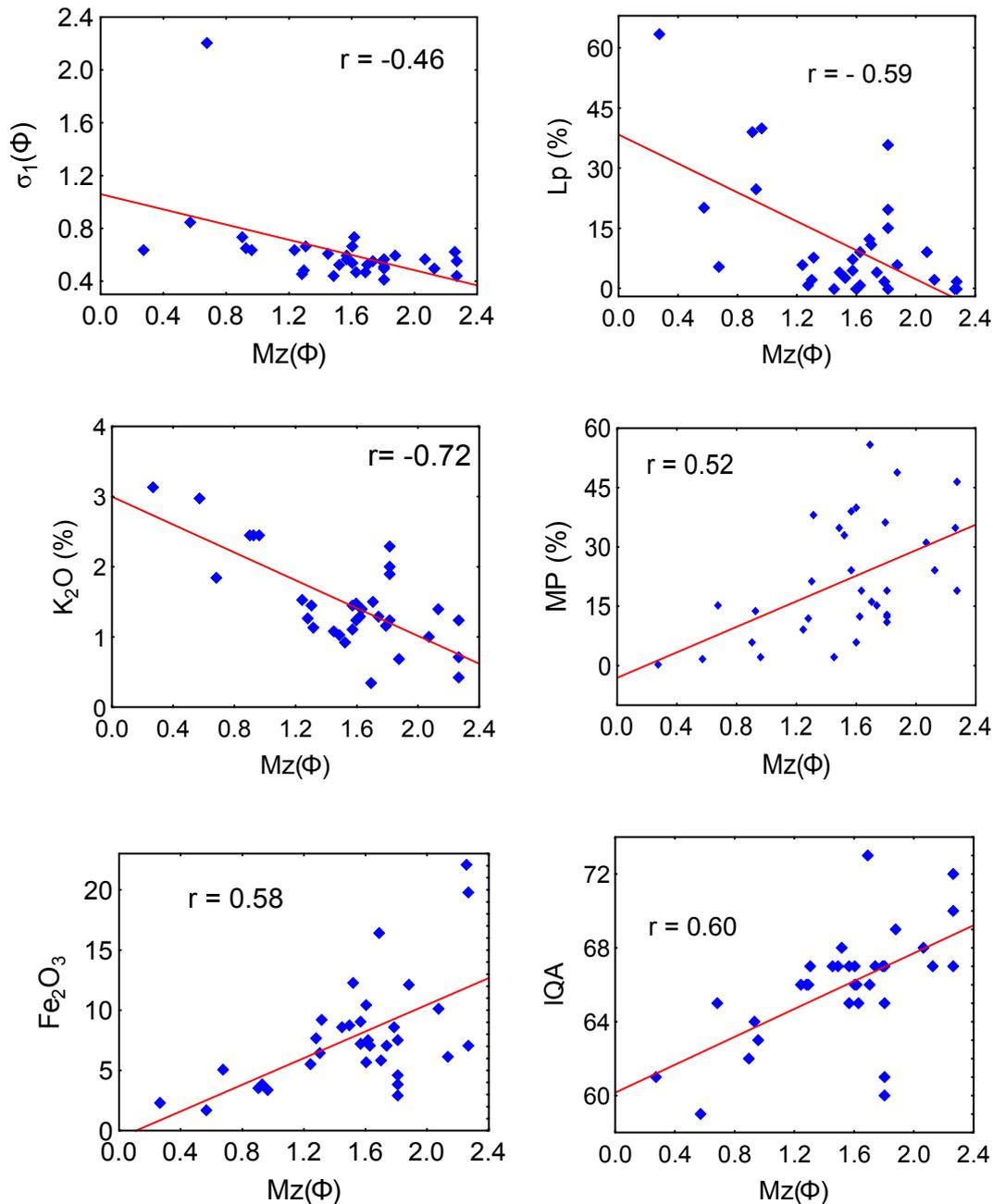


Figura 15. Correlaciones entre parámetros texturales y geoquímicos.

Los elementos traza en concentrados magnéticos rebasan las 100 mil ppm del Fe en el 45% de las muestras (Tabla 6) siendo más homogéneas en éste elemento las arenas de la cuenca del río Coahuayana que en JM rebasa las 203 mil ppm.

El segundo elemento traza importante por su abundancia es el Ca cuyo promedio en los concentrados magnéticos es de 23734 ppm. En los concentrados no magnéticos se presentan abundancias importantes de Fe y Ca, siendo JM la única zona de playa que rebasa las 100 mil

ppm de Fe. El Ca se concentra principalmente en la infraplaza de I con 43995 ppm mientras que en la infraplaza de A es la zona de menor concentración de Ca ya que apenas alcanza las 8528 ppm (Tabla 7). Estas concentraciones son un orden menor que las observadas en las muestras magnéticas. Con dichos elementos se obtienen correlaciones inversas tal y como suceden en la naturaleza: sí una zona es enriquecida con Fe, la misma zona será pobre de Ca y a la inversa. En las figuras 16 y 17 se excluyen el Fe y el Ca por presentar concentraciones de hasta tres órdenes superiores que el resto de los elementos traza determinados.

En los concentrados magnéticos y en los concentrados no magnéticos se observa una abundancia de Sr y Zr superior al resto de los elementos traza sin embargo no rebasa las 850 ppm/muestra. También el V presenta concentraciones elevadas, un promedio de 197 ppm en los concentrados magnéticos y de apenas 60 ppm en los concentrados no magnéticos. En la figura 18 se observa el contenido de Zr en la muestra total que en promedio es de 150 ppm. En el concentrado magnético se tiene en promedio 170 ppm del mismo elemento.

En muestra total se observa una atenuación de Zr debido al enmascaramiento que generan los demás elementos traza. En el concentrado no magnético la presencia de éste decrece hasta las 130 ppm promedio debido a que el concentrado magnético se llevó consigo la mayor cantidad de dicho elemento. Una tendencia similar presenta el Sr. El Rb prácticamente permanece invariante en la muestra total y en el concentrado no magnético mientras que en los concentrados magnéticos se observa una disminución drástica en el su contenido de Rb y Sr e incluso en el 26% de las muestras su presencia es nula. De todos los elementos traza analizados y que se hayan en los tres tipos de muestra (muestra total, concentrado magnético, concentrado no magnético) solamente el elemento Ni guarda una correlación directa y positiva con los MP,  $r = 0.46$  en las muestras totales, con  $r = 0.60$  en concentrado magnético y de  $r = 0.70$  en el concentrado no magnético.

Tabla 6. Elementos traza (ppm) en concentrados magnéticos. No se tiene muestra de CM, DS y EM.

Muestra	Mo	Zr	Sr	Rb	As	Zn	W	Cu	Ni	Fe	Mn	Cr	V	Ti	Sc	Ca	K
AI	11	197	431	38	54	90	0	33	0	115887	1532	0	147	5420	137	19229	9110
AM	11	204	444	27	70	119	30	40	0	151142	2270	0	167	6668	152	20305	6823
AS	7	220	494	45	19	41	32	0	0	32023	509	50	66	2301	106	14200	13206
BI	13	136	460	3	89	154	79	53	83	212571	3081	57	302	9147	223	32383	6182
BM	9	139	277	0	115	218	0	34	222	537332	4613	130	909	19033	67	25742	3545
BS	9	63	437	0	97	148	0	77	96	294637	3187	56	528	14317	163	25723	4649
CI	10	175	671	31	36	93	46	104	0	58670	964	69	108	3616	177	23768	9212
CM	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
CS	7	145	618	50	25	63	14	63	0	38133	578	58	82	2639	155	17478	13036
DI	8	189	614	17	29	85	13	44	31	53974	1007	81	101	3757	205	25152	7291
DM	0	177	537	14	27	87	0	66	60	52305	1100	94	93	3561	170	24722	7341
DS	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
EI	12	192	737	18	33	97	36	55	0	61218	1168	64	109	3297	204	24620	8138
EM	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
ES	9	176	590	11	39	119	52	58	84	78659	1565	103	105	3783	197	25798	7386
FI	12	196	718	20	24	78	17	28	0	44906	861	61	75	2837	136	20877	7701
FM	6	189	709	22	20	60	11	21	30	35767	626	56	80	2866	189	23670	8276
FS	11	184	674	16	30	92	35	36	46	59894	1210	60	99	3429	166	24357	7837
GI	10	191	676	22	28	98	0	37	23	57252	1026	60	90	3475	170	22466	8486
GM	10	174	534	8	48	127	0	64	118	106041	1963	71	148	5238	197	23690	6356
GS	2	168	516	11	32	84	0	22	99	71577	1301	80	166	5183	169	27016	7615
HI	4	190	662	24	20	68	0	11	24	40683	730	45	91	3101	139	21779	8784
HM	5	151	383	0	75	152	0	24	111	223036	2744	79	389	12319	36	22292	5401
HS	4	144	441	4	44	103	0	0	70	97858	1794	78	140	4992	167	21995	5776
II	4	90	197	0	75	174	21	35	215	220325	3658	124	301	10787	154	27285	2806
IM	4	157	499	13	29	93	0	78	0	62321	1305	38	95	3476	166	23872	7688
IS	5	142	435	0	57	134	0	40	130	133115	2456	52	178	5220	203	28613	5413
JI	7	130	283	0	69	162	0	37	155	182055	3402	97	241	8869	192	23542	4627
JM	4	127	190	0	70	180	0	44	194	203745	3666	113	258	10156	159	25092	4092
JS	7	163	532	9	46	119	17	18	60	108467	1956	64	174	5584	164	26554	6886
KI	0	307	387	0	58	149	0	68	42	139762	2661	52	205	8920	170	24601	6307
KM	9	186	515	8	63	142	26	24	142	156038	2262	12	236	7789	157	19128	6162
KS	6	153	341	0	71	166	0	41	112	199017	3231	72	244	9166	170	26092	5324

Tabla 7. Elementos traza (ppm) en concentrados no magnéticas.

Muestra	Mo	Zr	Sr	Rb	As	Zn	W	Cu	Ni	Fe	Mn	Cr	V	Ti	Sc	Ca	K
AI	5	96	366	65	7	12	0	5	0	6626	122	38	32	798	48	8528	15799
AM	10	101	464	54	16	31	12	0	0	22911	535	25	50	2836	132	18074	10365
AS	9	180	478	45	22	46	23	0	0	39589	933	33	57	6189	137	21078	8176
BI	5	114	830	37	14	31	30	24	0	19109	510	23	15	6664	218	30165	9408
BM	2	301	685	28	21	53	13	15	38	32376	947	9	0	6726	283	41244	8902
BS	10	28	810	41	16	33	33	46	0	21129	587	18	0	4766	186	24595	9146
CI	6	129	525	50	13	38	30	83	0	15645	261	52	31	5368	116	13795	11530
CM	6	106	619	53	13	37	13	80	0	14341	275	54	47	1393	123	16577	13004
CS	7	124	648	63	10	18	29	56	0	8752	143	40	30	709	79	11131	15472
DI	5	131	502	19	27	75	0	34	111	50869	1124	210	69	2275	207	34084	5090
DM	8	111	552	19	23	71	0	68	113	45836	1026	187	53	2029	227	32080	5673
DS	13	119	643	18	28	74	18	42	62	48786	1013	135	54	1970	193	26587	5483
EI	13	138	728	23	26	75	39	52	50	45923	922	144	60	2017	183	27632	6839
EM	9	127	605	16	25	68	40	32	62	45131	958	165	76	2131	229	30917	6183
ES	7	100	495	10	32	87	0	47	174	62610	1435	277	62	2202	221	32289	5040
FI	13	161	838	29	26	59	46	40	0	31602	595	71	50	2003	190	25376	7643
FM	6	159	724	32	16	46	14	16	0	23711	447	56	46	1800	165	22768	8407
FS	14	128	726	21	29	87	58	41	130	54232	1159	148	67	2034	232	29137	7024
GI	13	129	850	27	24	71	59	31	97	43565	893	99	64	2208	258	31152	6616
GM	11	119	800	25	24	73	35	53	86	43407	895	114	64	2509	235	31286	6780
GS	10	114	576	11	25	63	0	17	121	51762	1149	165	67	2139	265	30430	4164
HI	11	134	747	26	24	58	20	28	79	38764	796	94	61	2622	246	31859	7130
HM	10	127	540	25	23	65	52	14	74	50019	1082	116	78	3855	189	29153	6826
HS	9	119	498	15	25	69	16	18	89	50348	1091	150	66	2406	196	27388	5343
II	5	63	230	0	43	108	15	11	258	94514	2251	336	103	4327	272	43995	2408
IM	10	107	527	17	26	81	23	73	102	50449	1157	179	62	1999	202	32779	6612
IS	8	98	460	16	29	72	0	9	126	58548	1262	201	75	3029	233	38090	5824
JI	11	158	435	7	49	101	20	26	201	94457	2123	221	98	4430	272	38711	4074
JM	6	196	336	0	51	112	19	53	256	117293	2540	250	115	6084	257	40270	3517
JS	8	173	523	26	22	63	28	29	73	42249	911	167	76	2288	242	30741	7356
KI	9	143	549	18	28	66	22	43	68	53118	1126	119	86	3822	222	34147	5946
KM	6	147	500	22	27	72	0	10	83	55358	1278	128	66	3953	212	30606	5954
KS	6	97	477	15	27	72	14	44	130	57386	1275	136	85	3940	209	32877	5778

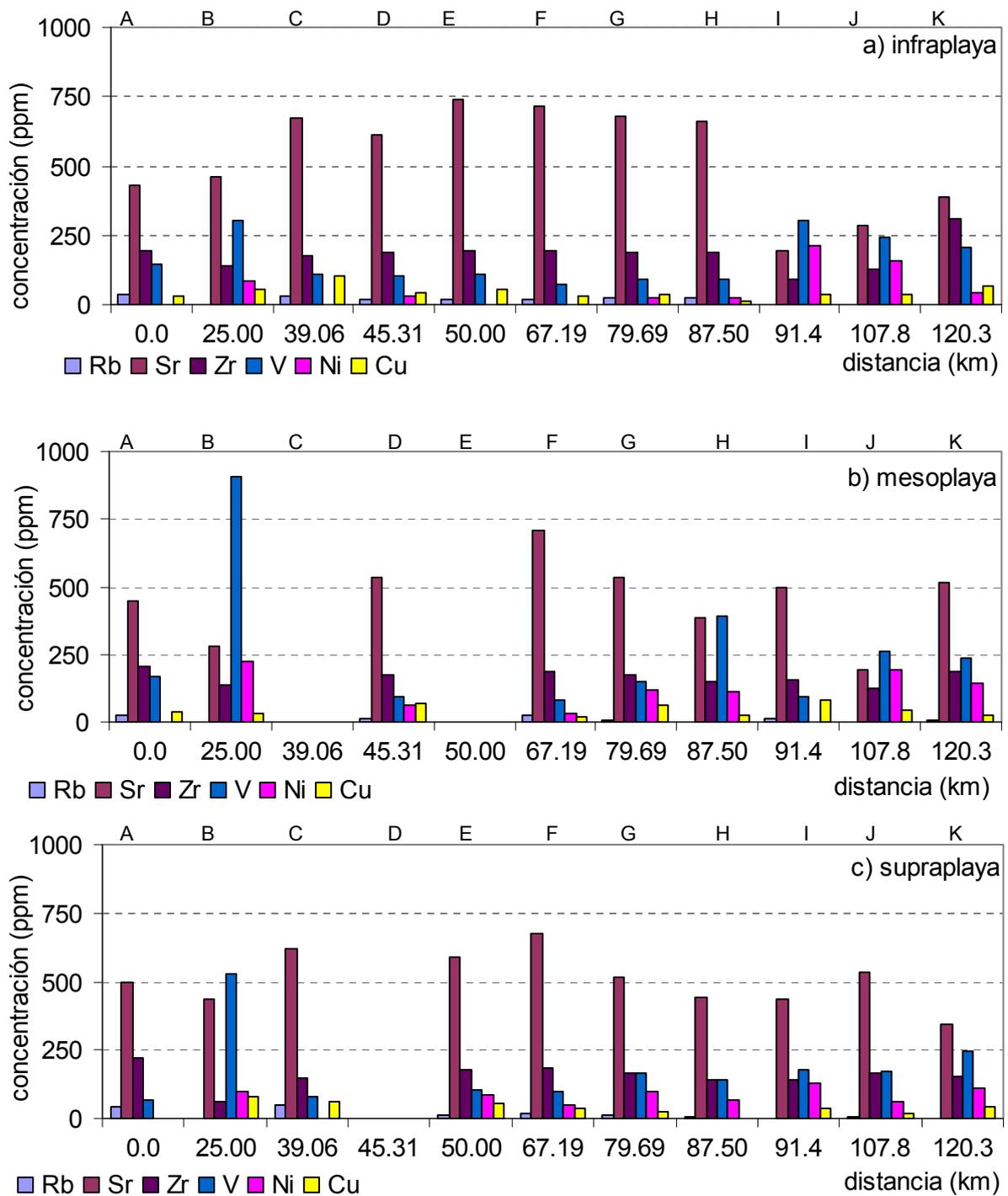


Figura 16. Elementos traza (ppm) en muestras con concentrados magnéticos en las diversas subzonas. No se tiene la muestra CM, EM y DS.

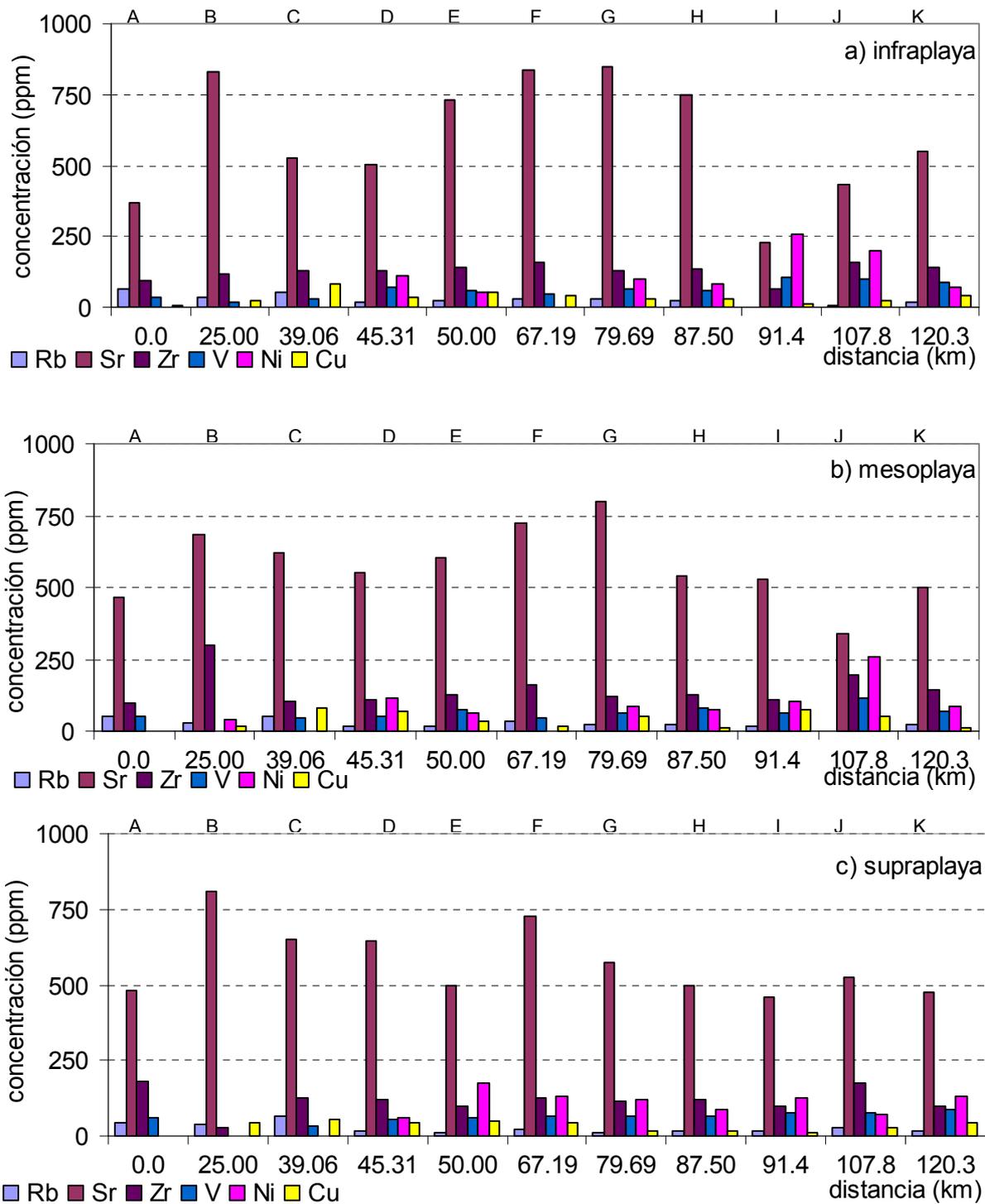


Figura 17. Elementos traza (ppm) en concentrados no magnéticos.

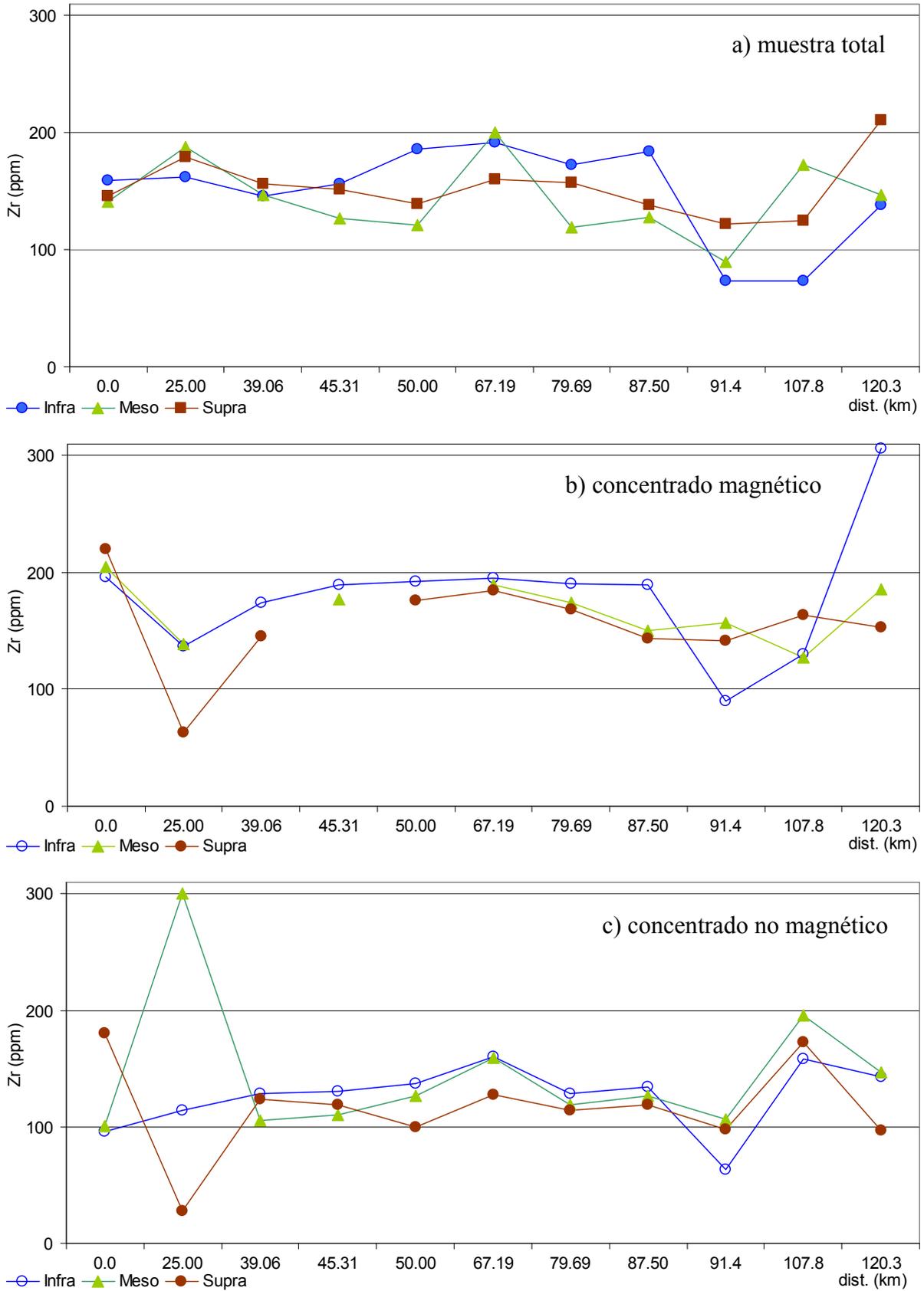


Figura 18. Concentración de Zr. No se tiene la muestra CM, EM y DS.

Los llamados elementos mayores son los elementos predominantes en cualquier análisis de rocas y se establecen al cuantificar el Si, Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K y P por lo general se hace solo para los cationes (Rollinson, 1995). Se asume que van acompañados por una cantidad de oxígeno y la suma de dichos elementos debe ser 100%. El análisis químico en las muestras totales (Tabla 8) analizadas presenta sedimentos de playa con un porcentaje superior al 50% de sedimentos cuarzosos (el peso del óxido de sílice ( $\text{SiO}_2$ ) en todas las muestras es elevado) (Fig. 19) principalmente las playas pertenecientes a la cuenca del río Cihuatlán. La distribución espacial de sílice guarda una dirección preferencial noroeste. Dado que el cuarzo es el mineral más común en sedimentos terrígenos (Pettijohn *et al.*, 1972), y que la contribución de éste en las arenas de playa analizadas es alta, que los elementos traza son semejantes (en algunos casos superiores) a los promedio de corteza continental se infiere rocas fuente de origen terrígeno de las rocas ígneas que alimenta a las playas de la costa de Colima.

Tabla 8. Elementos mayores (wt%), IQA: Índice Químico de Alteración, IAP: Índice de Alteración de Plagioclasa (modificada de Carranza-Edwards *et al.*, 2009) y peso molecular de los mismos elementos mayores (%) en muestra total.

Muestra	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	IQA	IAP	Total	Si	Ti	Al	Fe	Mn	Mg	Ca	Na	K	P
AI	68.65	0.66	14.58	3.84	0.08	1.43	3.37	4.28	1.99	0.14	61.00	62.20	99.90	32.10	0.40	7.72	2.69	0.06	0.86	2.41	3.18	1.65	0.06
AM	68.92	0.48	15.19	2.95	0.06	1.14	2.99	4.51	2.30	0.12	60.00	63.22	99.75	32.20	0.29	8.04	2.06	0.05	0.69	2.14	3.35	1.91	0.05
AS	70.85	0.23	15.98	1.63	0.03	0.43	2.10	4.68	2.97	0.09	59.00	65.74	99.69	33.10	0.14	8.46	1.14	0.02	0.26	1.50	3.47	2.47	0.04
BI	61.05	0.63	17.12	4.53	0.10	2.50	6.20	4.40	1.90	0.20	65.00	58.95	99.68	28.50	0.38	9.06	3.17	0.08	1.51	4.43	3.26	1.58	0.09
BM	60.41	0.73	16.84	5.05	0.11	2.60	6.41	4.30	1.83	0.32	65.00	58.36	99.61	28.20	0.44	8.91	3.53	0.09	1.57	4.58	3.19	1.52	0.14
BS	62.04	0.55	18.66	3.84	0.08	1.79	5.16	4.72	2.45	0.13	64.00	62.13	100.30	29.00	0.33	9.88	2.69	0.06	1.08	3.69	3.50	2.03	0.06
CI	64.78	0.46	17.00	3.49	0.06	1.74	3.75	4.59	2.45	0.14	62.00	63.56	99.54	30.30	0.28	9.00	2.44	0.05	1.05	2.68	3.41	2.03	0.06
CM	65.20	0.43	17.00	3.40	0.06	1.70	3.69	4.51	2.44	0.13	63.00	63.97	100.60	30.50	0.26	9.00	2.38	0.05	1.03	2.64	3.35	2.03	0.06
CS	66.36	0.29	17.62	2.32	0.03	0.89	3.19	4.74	3.12	0.12	61.00	64.65	99.60	31.00	0.17	9.33	1.62	0.02	0.54	2.28	3.52	2.59	0.05
DI	58.18	0.74	13.90	7.27	0.14	6.09	6.41	3.55	1.45	0.19	65.00	55.56	99.62	27.20	0.44	7.36	5.09	0.11	3.67	4.58	2.63	1.20	0.08
DM	58.95	0.76	14.57	7.06	0.14	5.91	6.16	3.75	1.40	0.17	65.00	57.06	100.06	27.60	0.46	7.71	4.94	0.11	3.56	4.40	2.78	1.16	0.07
DS	57.72	0.77	14.66	7.57	0.14	6.40	6.35	3.59	1.24	0.18	67.00	57.45	99.68	27.00	0.46	7.76	5.30	0.11	3.86	4.54	2.66	1.03	0.08
EI	59.36	0.75	16.33	6.45	0.11	4.48	5.66	4.14	1.45	0.20	66.00	60.29	99.88	27.80	0.45	8.64	4.51	0.09	2.70	4.05	3.07	1.20	0.09
EM	58.08	0.79	14.48	7.63	0.15	6.84	6.36	3.67	1.26	0.18	66.00	56.86	100.03	27.20	0.47	7.67	5.34	0.12	4.13	4.55	2.72	1.05	0.08
ES	57.47	0.77	12.86	8.62	0.17	8.54	6.48	3.12	1.08	0.17	67.00	55.10	99.96	26.90	0.46	6.81	6.03	0.13	5.15	4.63	2.31	0.90	0.07
FI	60.17	0.70	17.32	5.64	0.10	3.48	5.52	4.26	1.48	0.19	67.00	61.83	99.85	28.10	0.42	9.17	3.95	0.08	2.10	3.95	3.16	1.23	0.08
FM	60.86	0.69	17.35	5.50	0.10	3.15	5.19	4.43	1.54	0.19	66.00	62.17	100.10	28.50	0.41	9.18	3.85	0.08	1.90	3.71	3.29	1.28	0.08
FS	58.64	0.75	15.33	7.11	0.13	5.71	6.05	3.76	1.28	0.18	67.00	58.89	99.72	27.40	0.45	8.12	4.97	0.10	3.44	4.32	2.79	1.06	0.08
GI	59.22	0.70	16.67	6.11	0.11	4.03	6.04	4.10	1.39	0.17	67.00	60.11	99.65	27.70	0.42	8.82	4.27	0.09	2.43	4.32	3.04	1.15	0.07
GM	58.42	0.75	15.89	6.99	0.14	5.48	6.55	3.84	1.24	0.16	67.00	58.51	100.45	27.30	0.45	8.41	4.89	0.11	3.31	4.68	2.85	1.03	0.07
GS	58.56	0.77	14.58	7.51	0.14	6.14	6.37	3.63	1.30	0.19	66.00	57.04	99.90	27.40	0.46	7.72	5.25	0.11	3.70	4.55	2.69	1.08	0.08
HI	60.71	0.70	16.80	5.77	0.10	3.32	5.87	4.22	1.50	0.18	66.00	60.29	100.30	28.40	0.42	8.89	4.04	0.08	2.00	4.20	3.13	1.25	0.08
HM	55.67	0.99	12.50	10.10	0.18	8.35	6.91	2.88	1.01	0.17	68.00	53.99	99.69	26.00	0.59	6.62	7.07	0.14	5.04	4.94	2.14	0.84	0.07
HS	57.28	0.92	12.69	9.27	0.17	7.75	6.69	3.06	1.14	0.17	67.00	54.23	99.99	26.80	0.55	6.72	6.48	0.13	4.67	4.78	2.27	0.95	0.07
II	48.96	1.51	5.81	16.48	0.30	15.81	8.15	1.05	0.34	0.12	73.00	37.29	99.65	22.90	0.91	3.08	11.53	0.23	9.54	5.83	0.78	0.28	0.05
IM	57.94	0.75	11.64	8.73	0.18	8.95	7.08	2.83	1.04	0.13	67.00	51.68	100.03	27.10	0.45	6.16	6.11	0.14	5.40	5.06	2.10	0.86	0.06
IS	58.55	0.82	11.62	9.00	0.18	8.38	6.46	2.77	1.10	0.15	67.00	53.27	99.78	27.40	0.49	6.15	6.30	0.14	5.05	4.62	2.06	0.91	0.07
JI	54.35	1.06	8.76	12.18	0.24	12.39	7.94	1.93	0.68	0.12	69.00	45.01	100.10	25.40	0.64	4.64	8.52	0.19	7.47	5.68	1.43	0.56	0.05
JM	47.40	2.18	7.05	19.80	0.30	13.62	7.43	1.35	0.41	0.19	72.00	43.06	100.00	22.20	1.31	3.73	13.85	0.23	8.21	5.31	1.00	0.34	0.08
JS	55.66	1.28	10.57	12.32	0.21	9.26	6.55	2.39	0.93	0.15	68.00	51.88	100.00	26.00	0.77	5.6	8.62	0.16	5.58	4.68	1.77	0.77	0.07
KI	58.64	0.92	13.17	8.59	0.16	6.44	6.33	3.16	1.16	0.15	67.00	55.86	99.87	27.40	0.55	6.97	6.01	0.12	3.88	4.52	2.34	0.96	0.07
KM	58.06	1.19	12.51	10.48	0.18	6.34	6.03	3.12	1.24	0.14	66.00	55.19	100.48	27.10	0.71	6.62	7.33	0.14	3.82	4.31	2.31	1.03	0.06
KS	47.47	2.73	9.38	22.09	0.25	8.78	5.97	1.99	0.70	0.20	70.00	52.16	100.00	22.20	1.64	4.97	15.45	0.19	5.30	4.27	1.48	0.58	0.09

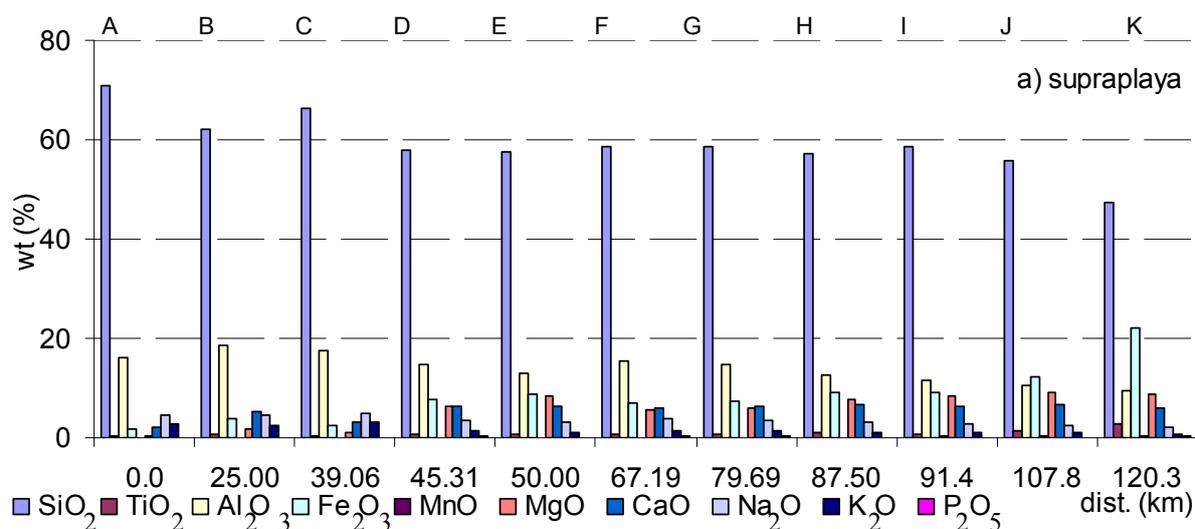
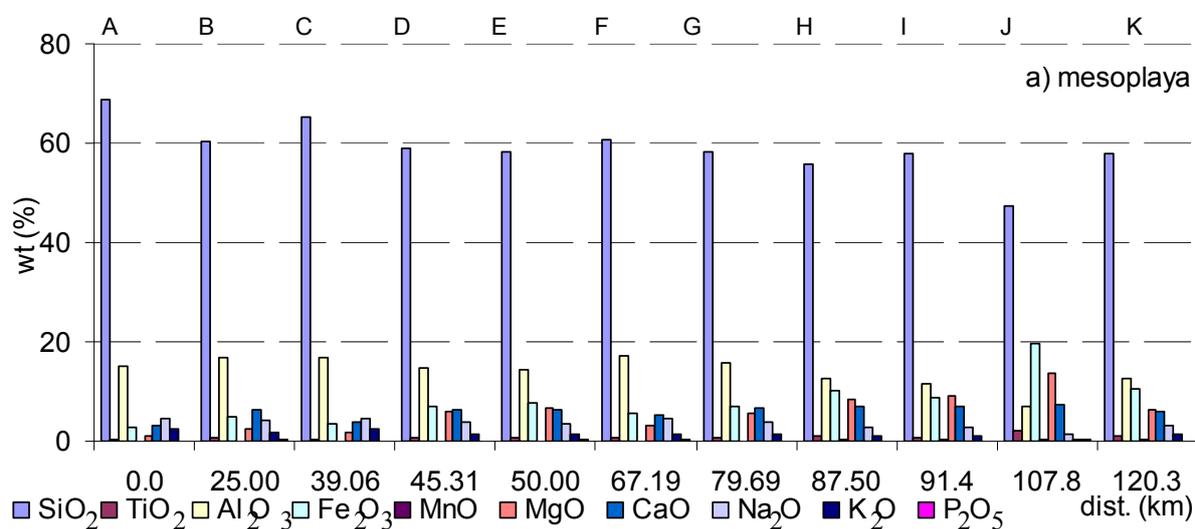
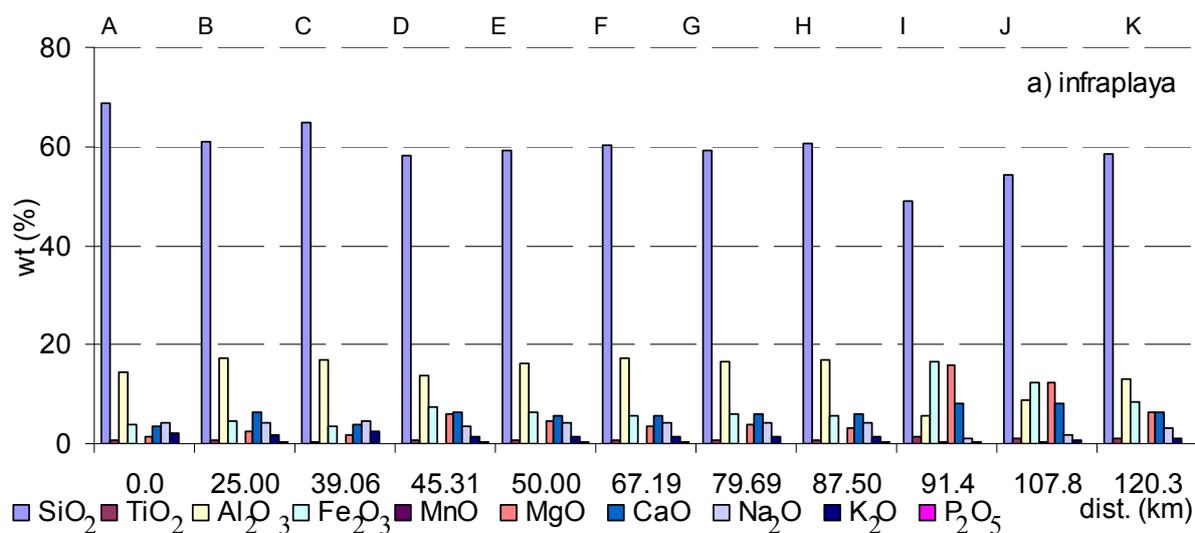


Figura 19. Elementos mayores (wt%) en muestra total. Elaborada con datos de Carranza-Edwards *et al.*, 2009).

El óxido de aluminio también presenta concentraciones elevadas en todas las playas sin embargo no es superior al 20 % en ninguna muestra. Los porcentajes más significativos del  $\text{Al}_2\text{O}_3$  están en las playas de la cuenca del río Coahuayana. Entre mayor sea el contenido de sílice en una playa menor es el contenido de elementos metálicos (en este caso los óxido de fierro, titanio y aluminio). El óxido de aluminio que es el principal constituyente de las arcillas y está por encima de 12% del peso total en casi todas las zonas de todas las playas. En la supraplaya de B se tiene la proporción más elevada de dicho óxido (18.66 wt%). El óxido de férrico tiende a incrementar su concentración en dirección sureste siendo las playas de la cuenca del río Armería (HM e II) quienes sobrepasan el 10 wt% y KS (de la cuenca del río Coahuayana) la de mayor proporción (22.09 wt%) de toda la costa. La presencia de carbonatos (óxido de calcio) es inferior a las ya mencionadas, apenas acumula en promedio un 5.8%. También el óxido de magnesio presenta tendencia creciente en la misma dirección sureste pero en menor proporción.

Los elementos mayores que tienen una baja presencia (inferior a 5 wt%) son los óxidos de titanio, de manganeso y fósforo que también guardan tendencia creciente hacia el sureste. Se utilizaron algunos trazadores geoquímicos como la correlación  $\text{SiO}_2\text{-CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$  que se acentúan negativamente con  $r < - 0.70$  y el  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{K}_2\text{O}$  las cuales son de correlación positiva y  $> 0.70$  (Fig. 20). La correlación que establecen el  $\text{K}_2\text{O}$  y el  $\text{Na}_2\text{O}$  indican un dominio de plagioclasas sobre los feldespatos en las tres zonas de playa y con una tendencia decreciente de ambos hacia el extremo sureste (Fig. 21).

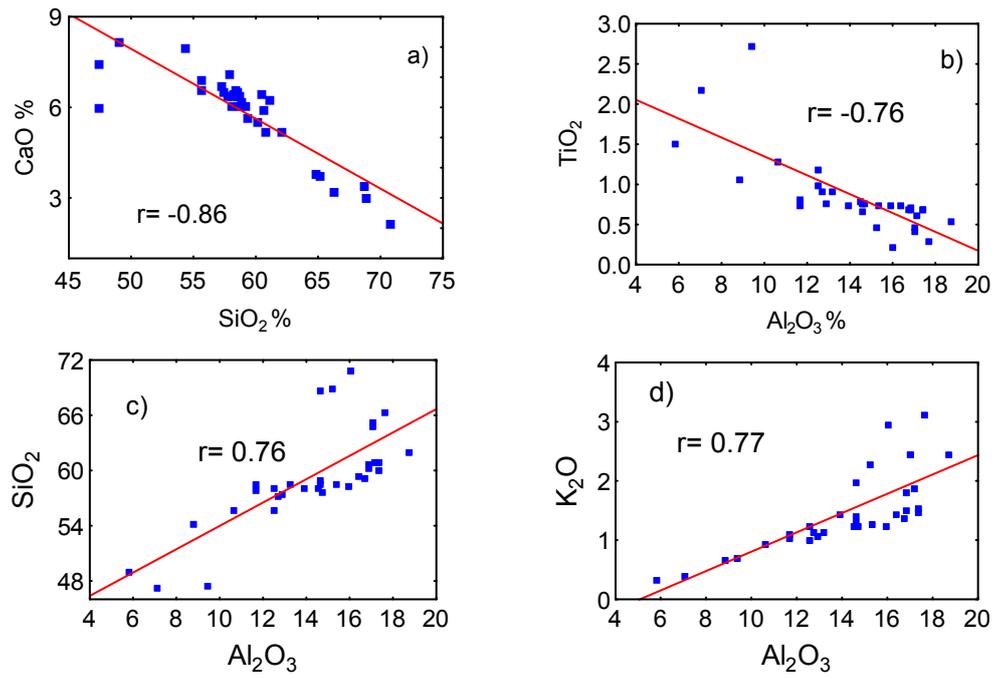


Figura 20. Correlaciones de elementos mayores en muestra total.

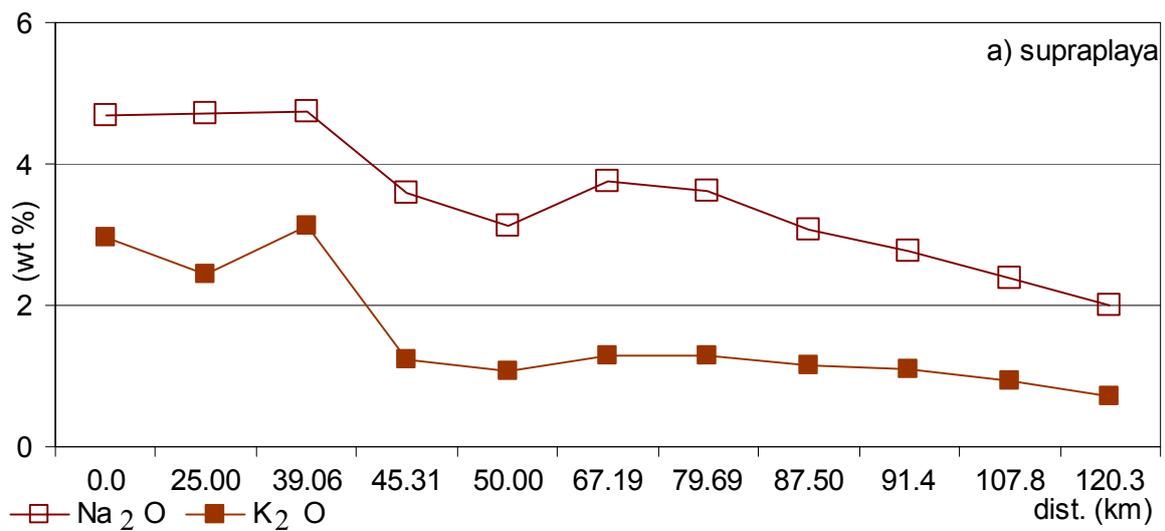
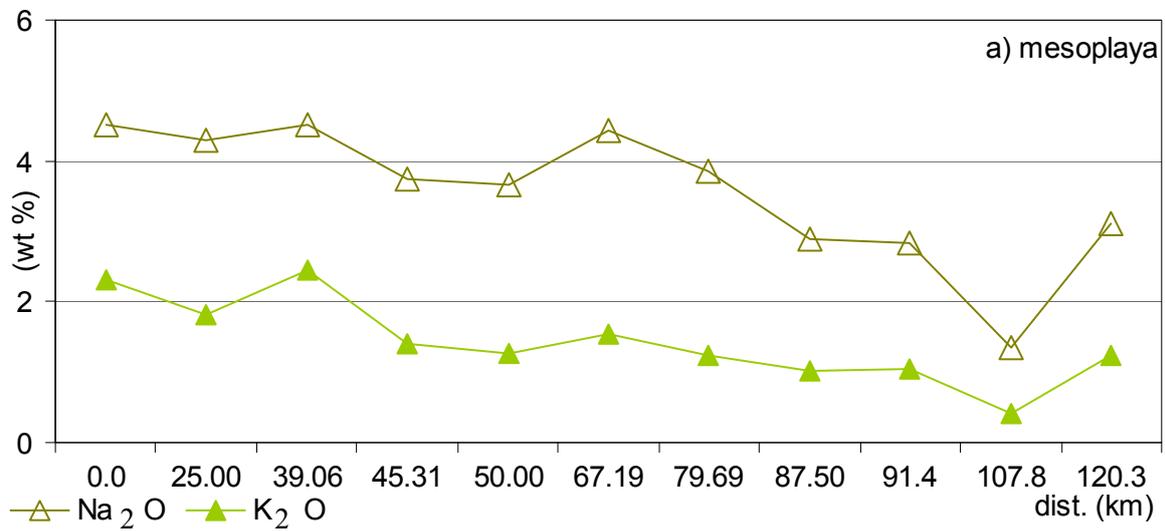
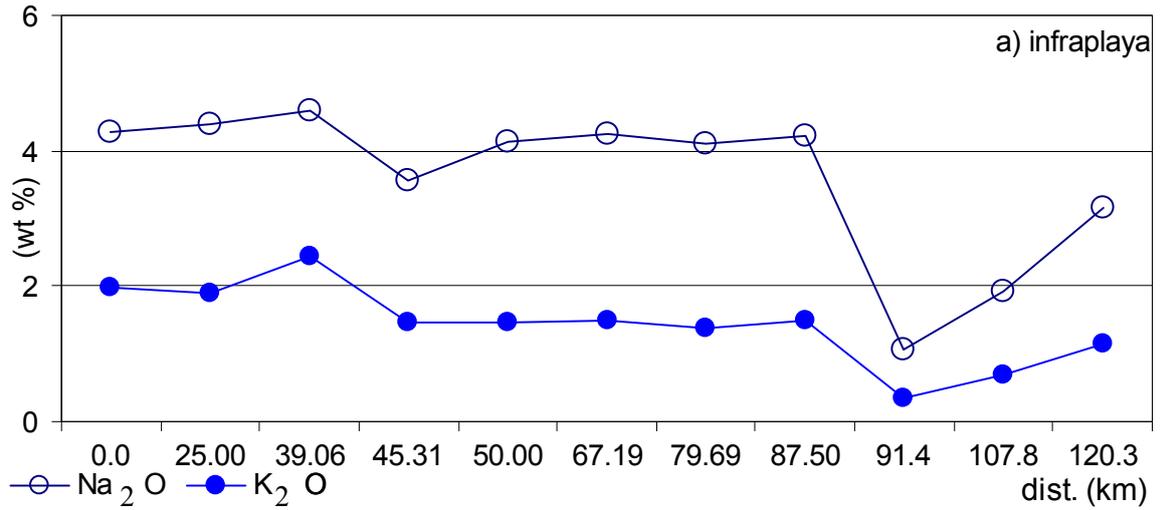


Figura 21. Abundancia de compuestos comunes en plagioclasas y feldespatos.

Con la determinación de elementos mayores en los concentrados magnéticos y en los concentrados no magnéticos se observa mayor enriquecimiento en % de titanio, fierro y manganeso dentro de los concentrados magnéticos con tendencia acumulativa hacia el sureste mientras que el contenido de sílice y potasio disminuyen en la misma dirección y el calcio prácticamente es invariable a lo largo de toda la línea de costa.

Dentro de los concentrados no magnéticos sigue dominando el fierro pero en menor proporción (en ninguna muestra alcanza el 10%), seguido del sílice, calcio, potasio y titanio. La figura 23 muestra la variación geoquímica lateral y transversal que tienen las arenas de playa de la costa de Colima en los tres tipos de muestra (muestra total, concentrado magnético y concentrado no magnético). Se identifica al Si como el mayor contribuyente en todas las muestras rebasando el 30% del constituyente de las muestras completas de arenas en la zona noroeste. Se tiene un decremento en los componentes más susceptibles a la abrasión e intemperismo en forma transversal, es decir, conforme las zonas de estudio se ubican más cercanas a la acción del oleaje y mareas las cantidades de Mn (ése es el de menor proporción en todas las zonas), Ca y K tienden a decrecer. Así mismo, las proporciones de fierro son muy bajas y se identifican en los tres tipos de muestra y en las tres zonas de la línea de costa (noroeste, centro y sureste), (Fig. 22).

A pesar de que la zona centro contiene menor proporción de fierro, éste es el elemento dominante en los concentrados magnéticos cuya acumulación es en dirección Este los cuales presentan una densidad superior en los concentrados magnéticos (Fig. 23) y hace suponer una concentración de minerales pesados en las regiones altas de la playa donde existe dominio de arenas medias a finas y de moderadamente a bien clasificadas de colores oscuros donde la magnetización remanente natural (MRN) tiende a incrementarse conforme la densidad de los sedimentos aumenta. Dentro de los concentrados no magnéticos sigue dominando el fierro pero en menor proporción (en ninguna muestra alcanza el 10%) que el concentrado magnético

seguido del sílice, calcio, potasio y titanio, las tendencias geoquímicas en todas las muestras son similares.

Probablemente debido a condiciones de humedad local media en la cuenca del río Armería el mayor valor de IQA (73.00) está en la infraplaya de I, sin embargo ésta no es la zona promedio mayor sino la cuenca del río Coahuayana con un promedio en IQA de 68.67, es decir, ésta es la zona de mayor alteración química ya que las condiciones de clima y humedad son de proporciones mayores que en las otras dos cuencas.

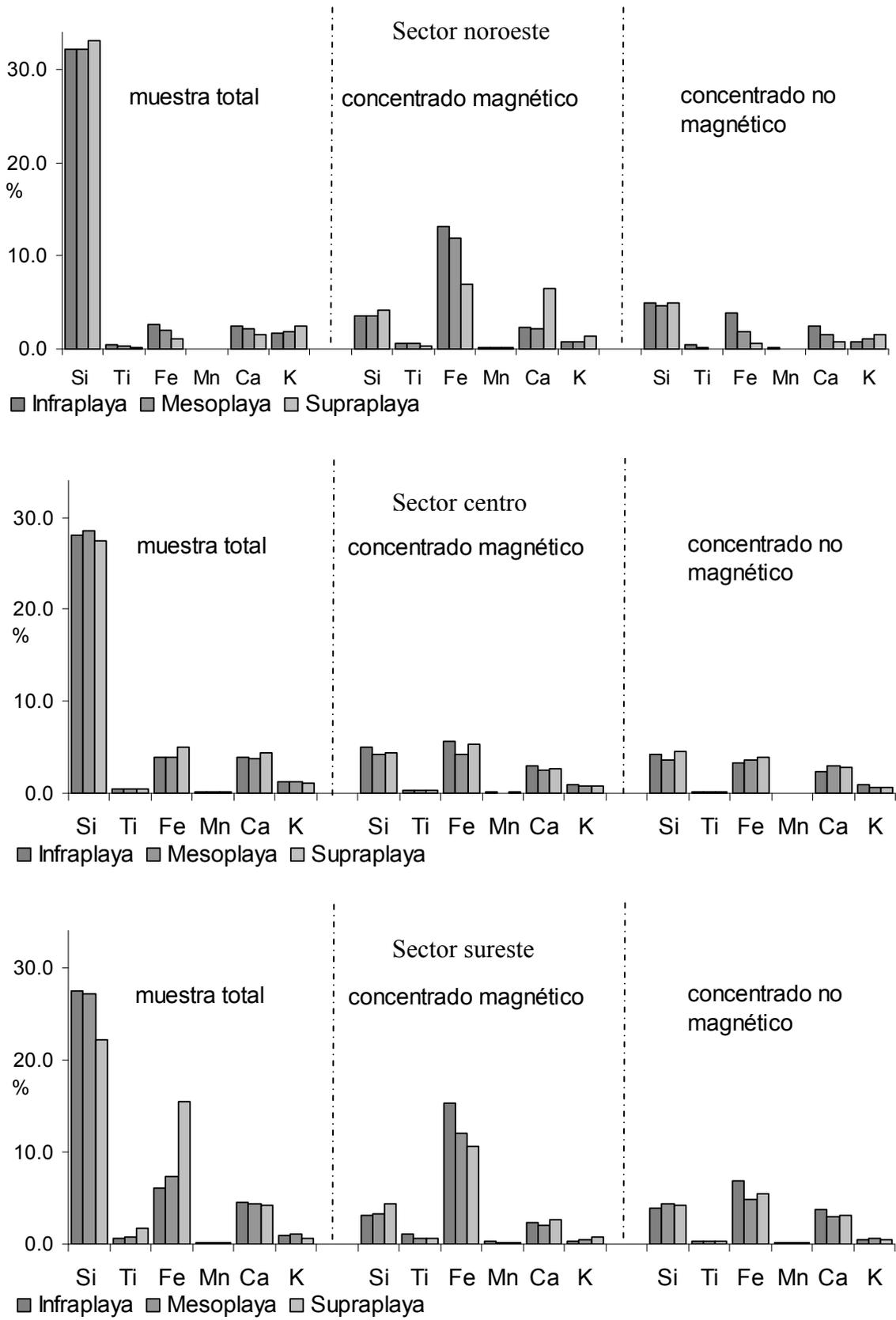


Figura 22. Elementos mayores (%) de los tres tipos de muestras en las tres subzonas de playa para los tres sectores considerados.

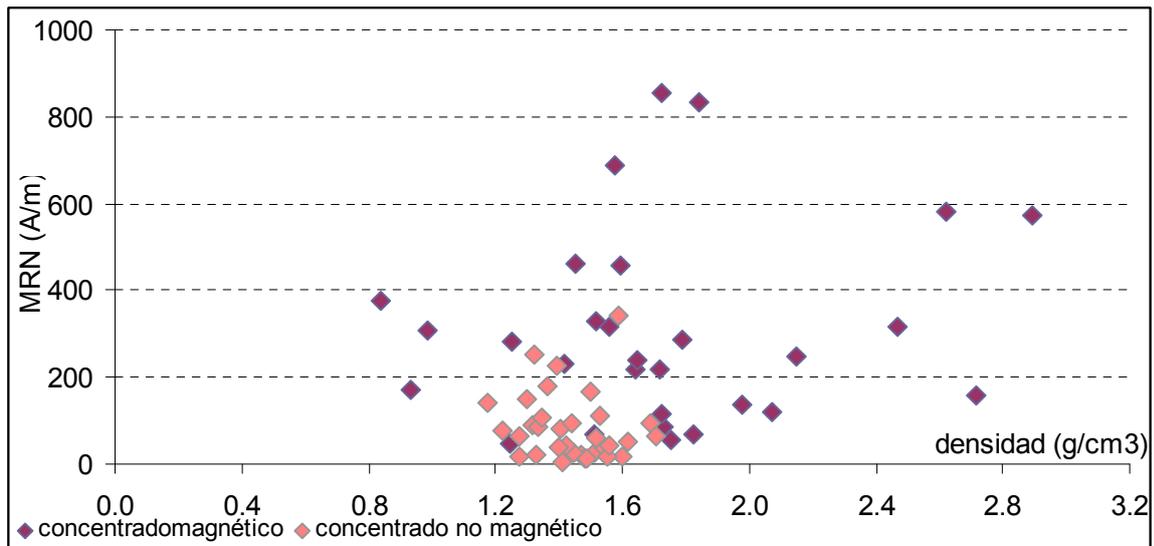


Figura 23. Densidad de las arenas de playa vs. MRN

Los valores promedio del índice de alteración de plagioclasas (IAP), crecen en dirección noroeste, siendo las playas de la cuenca del río Cihuatlán las de mayor valor (IAP~61 %), seguida de Armería con IAP = 56 % y se tiene el menor desgaste de plagioclasa en la parte sureste de la costa con IAP = 50 %. Los valores que muestra el índice de madurez en todas las playas son muy bajos de forma tal que se asume que el desgaste al cual están siendo sometidos los sedimentos se lleva a cabo en el sitio del depósito, es decir, el oleaje y las mareas son los principales contribuyentes en el retrabado al cual están siendo sometidas las arenas de las playas de Colima.

Tabla 9. Elementos mayores (wt %) en los concentrados magnéticos y no magnéticos.

Muestra	Concentrado magnético						Concentrado no magnético					
	Si	Ti	Fe	Mn	Ca	K	Si	Ti	Fe	Mn	Ca	K
AI	3.575	0.657	13.198	0.170	2.265	0.745	4.903	0.456	3.872	0.088	2.520	0.809
AM	3.524	0.667	11.871	0.174	2.155	0.795	4.692	0.201	1.868	0.036	1.501	1.035
AS	4.209	0.373	6.913	0.099	6.501	1.446	5.018	0.053	0.611	0.010	0.816	1.527
BI	3.003	0.773	15.219	0.178	2.974	0.508	5.057	0.415	2.683	0.072	3.437	1.123
BM	3.711	0.716	15.572	0.179	8.948	0.837	4.292	0.105	1.824	0.043	2.952	0.900
BS	2.796	1.211	21.499	0.202	2.516	0.221	4.252	0.503	2.918	0.081	3.183	0.778
CI	4.409	0.421	6.381	0.101	7.557	1.348	5.658	0.229	2.883	0.053	2.557	1.153
CM	---	---	---	---	---	---	5.021	0.138	2.199	0.046	1.977	1.074
CS	3.209	0.213	3.102	0.055	9.005	1.344	4.302	0.082	1.268	0.017	1.289	0.913
DI	3.954	0.421	7.134	0.136	2.715	0.724	3.761	0.221	5.032	0.119	3.453	0.423
DM	3.793	0.327	6.298	0.131	2.458	0.646	4.073	0.233	5.491	0.123	3.709	0.491
DS	---	---	---	---	---	---	3.917	0.205	3.845	0.072	2.750	0.580
EI	6.030	0.424	6.156	0.110	3.240	0.991	4.799	0.254	4.861	0.105	3.389	0.617
EM	4.554	0.391	7.465	0.150	3.021	0.646	4.266	0.246	4.777	0.094	2.928	0.659
ES	---	---	---	---	---	---	4.239	0.229	6.373	0.143	3.989	0.435
FI	5.044	0.388	5.648	0.103	2.945	0.948	4.204	0.234	3.289	0.061	2.337	0.867
FM	4.285	0.270	4.187	0.076	2.461	0.806	3.670	0.205	3.561	0.069	3.031	0.605
FS	4.422	0.355	5.366	0.105	2.597	0.811	4.622	0.223	3.952	0.077	2.889	0.686
GI	4.405	0.401	5.818	0.100	2.626	0.886	4.808	0.237	3.726	0.066	3.533	0.779
GM	5.256	0.562	9.096	0.169	3.192	0.956	4.051	0.223	3.585	0.074	3.104	0.623
GS	4.270	0.491	8.537	0.167	2.658	0.620	4.052	0.233	5.198	0.120	3.577	0.464
HI	5.524	0.477	7.616	0.137	3.006	1.007	4.094	0.374	5.613	0.127	3.550	0.466
HM	3.236	0.918	16.710	0.213	2.003	0.427	3.670	0.390	6.144	0.129	3.217	0.515
HS	4.268	0.453	8.411	0.136	2.565	0.755	3.531	0.194	3.195	0.060	5.524	0.726
II	3.035	1.113	17.771	0.288	2.697	0.270	3.972	0.381	9.220	0.221	4.645	0.258
IM	4.230	0.354	7.225	0.164	2.547	0.680	4.460	0.217	5.064	0.110	3.304	0.568
IS	3.623	0.842	12.303	0.227	2.909	0.442	3.718	0.199	5.030	0.115	3.475	0.460
JI	3.540	0.583	12.015	0.229	2.917	0.421	4.194	0.364	8.149	0.187	3.977	0.375
JM	2.519	1.080	17.246	0.246	2.215	0.267	3.668	0.434	8.186	0.207	3.912	0.291
JS	4.623	0.404	8.585	0.171	2.760	0.662	4.298	0.258	4.449	0.094	2.833	0.736
KI	3.162	1.126	15.258	0.240	2.265	0.361	3.923	0.348	6.882	0.160	3.815	0.444
KM	3.257	0.639	12.019	0.178	2.093	0.498	4.396	0.268	4.776	0.099	3.032	0.624
KS	4.426	0.601	10.545	0.184	2.585	0.706	4.279	0.258	5.465	0.126	3.184	0.524

En la cuenca del río Coahuayana predomina un clima caliente a muy caliente y humedad media que hace proponer que dichos factores alteran con mayor facilidad la roca volcánica fuente y provoca un mayor contenido de minerales oscuros y pesados en ésta zona, los cuales poseen un índice de alteración de plagioclasas (IAP) relativamente más pequeño que las arenas de playa de las otras dos cuencas estudiadas.

## 8. CARACTERÍSTICA DE PROPIEDADES MAGNÉTICAS

Las propiedades magnéticas de rocas dependen de un amplio rango de factores, como la litología, origen, historia térmica y metamórfica (enfriamiento y/o recalentamiento) y alteraciones de intemperismo (Bleil y Smith, 1988; Böhnell *et al.*, 1988; Herzog *et al.*, 1988; Urrutia-Fucugauchi *et al.*, 1991). En el caso de ambientes sedimentarios, los estudios de propiedades magnéticas se emplean para investigar tipos de ambiente, transporte y flujos de sedimentos, roca fuente (Alva-Valdivia *et al.*, 1992; Watkins y Maher, 2003; Gawali *et al.*, 2010), asociaciones de los minerales magnéticos con paleoclimas y paleoambientes (Robinson, 1986; Bloemendal *et al.*, 1988; Karlin, 1990; Brachfeld y Banerjee, 2000; Pérez-Cruz y Urrutia-Fucugauchi, 2009; Pérez-Cruz y Urrutia-Fucugauchi, 2010; Hatffiel, *et al.*, (en prensa)). La susceptibilidad magnética, propiedad de todos los materiales se define en términos de la facilidad con la que los minerales se pueden magnetizar debido a la aplicación de un campo magnético (Thompson y Olfield, 1986). Es el parámetro magnético más utilizado y su medición es un proceso no destructivo. Todas las sustancias son magnéticas y se clasifican en los siguientes tres grupos: diamagnéticas, paramagnéticas y ferromagnéticas. Los minerales diamagnéticos (Fig. 24), como el cuarzo y la halita consisten de átomos magnéticos donde los momentos magnéticos de sus electrones aislados (no apareados) son compensados y donde el valor de susceptibilidad magnética es negativo y pequeño (del orden de  $10^{-5}$  SI). Una vez que dichos minerales son sometidos a un campo magnético ellos adquieren una magnetización inducida y pequeña que se reduce a cero una vez que el campo deja de actuar sobre estos (Butler, 1998).

En minerales paramagnéticos como la pirita, siderita, cromita, y olivino la orientación de los spines es caótica (Fig. 25) y solo un pequeño porcentaje de los ejes magnéticos se orienta de acuerdo con el campo magnético.

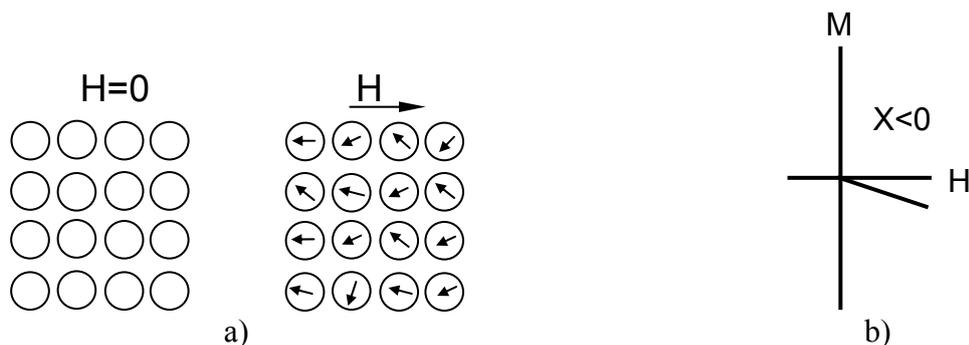


Figura 24. Material diamagnético, a) Esquema de los dipolos magnéticos, b) comportamiento de sustancia diamagnética. H: campo magnético, M: magnetización, X: susceptibilidad magnética (tomado de Butler, 1998).

En este tipo de materiales la magnetización también se reduce a cero una vez que el campo magnético ha cesado además, el paramagnetismo es directamente proporcional a la temperatura, es decir, la susceptibilidad disminuye con el incremento de la temperatura. En éstos minerales la susceptibilidad es positiva y pequeña.

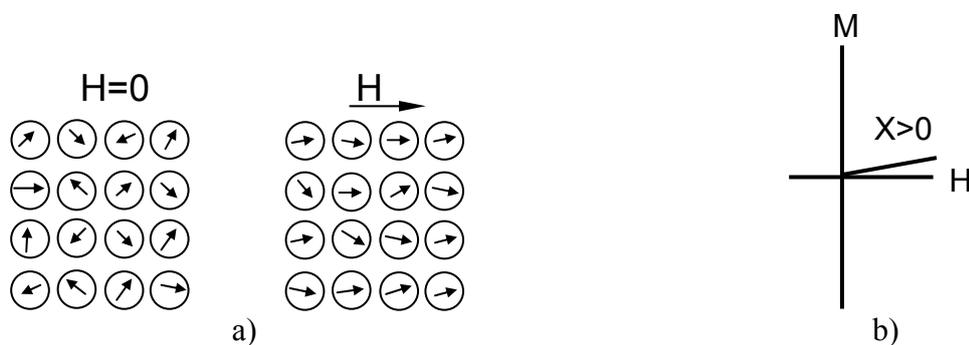


Figura 25. Material paramagnético, a) Esquema de los dipolos magnéticos, b) Comportamiento de sustancia paramagnética. H: campo magnético, M: magnetización, X: susceptibilidad magnética (tomado de Butler, 1998).

Por otro lado, los minerales ferromagnéticos presentan valores positivos y grandes de susceptibilidad magnética (Fig. 26). Estos materiales tienen la capacidad de registrar el campo magnético aplicado y conservarlo una vez que éste se deja de aplicar. El intercambio de energía produce acoplamiento paralelo o antiparalelo y provoca dos tipos de materiales, los ferrimagnéticos como el hierro o la magnetita cuyos momentos magnéticos son

antiparalelos y diferentes mientras que los materiales antiferromagnéticos como la ilmenita y la ulvoespinela tienen momentos magnéticos iguales y antiparalelos (Butler, 1998).

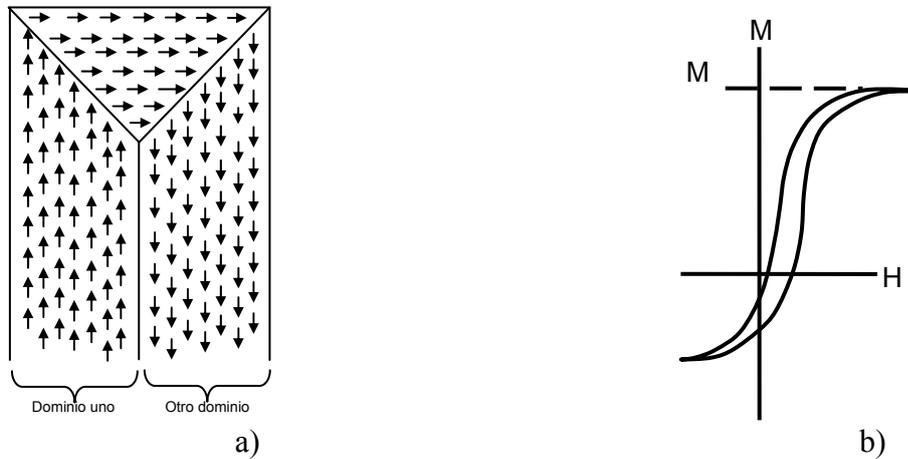


Figura 26. Material ferromagnético, a) Esquema de los dipolos magnéticos, b) comportamiento de sustancia ferromagnética. H: campo magnético, M: magnetización,  $M_s$ : Magnetización de saturación, X: susceptibilidad magnética (tomado de Butler, 1998).

La permeabilidad magnética de los minerales ( $\mu_{\text{mag}}$ ) determina la dependencia de la imantación M (momento magnético) que tiene el mineral con respecto a la intensidad del campo magnético H (Butler, 1998). Por lo general se mide a temperatura ambiente en muestras de roca con un volumen o masa conocida y una dependencia lineal de M versus H (Tarling y Hrouda, 1993; Butler, 1998) y está relacionada con la susceptibilidad magnética ( $X = \mu^{-1} \text{ mag}$ ) de cada mineral. Para cuantificar el contenido de minerales pesados y opacos Shakar y colaboradores en 1996 emplean la caracterización del campo magnético en playas.

### 8.1 Susceptibilidad magnética

La susceptibilidad magnética es una medida no destructiva del parámetro magnetismo que varía de acuerdo al material analizado, la temperatura y la intensidad de campo aplicado. Una variación significativa y creciente de susceptibilidad magnética se observa en los concentrados magnéticos hasta en un orden mayor que los valores de la muestra total (Tabla 10) y se infiere una atenuación de susceptibilidad magnética en muestra total debida a los

constituyentes diamagnético inmersos en cada muestra como es el cuarzo cuya presencia dentro de los elementos mayores superan el 47% del peso total en cada muestra. Las variaciones entre los valores de  $X_{af}$  y  $X_{bf}$  medidos en cada muestra son mínimas (Figura 27, 28, 29).

Tabla 10. Susceptibilidad magnética en baja y alta frecuencia, magnetización remanente natural (MRN).

Muestra	Muestra total		Concentrado magnético		MRN (A/m)	Concentrado no magnético		MRN (A/m)
	$X=X_{bf}$ (SIx10 <sup>-5</sup> )	$X=X_{af}$ (SIx10 <sup>-5</sup> )	$X=X_{bf}$ (SIx10 <sup>-5</sup> )	$X=X_{af}$ (SIx10 <sup>-5</sup> )		$X=X_{bf}$ (SIx10 <sup>-5</sup> )	$X=X_{af}$ (SIx10 <sup>-5</sup> )	
AI	132.433	169.000	50.200	51.500	307.20	52.100	53.700	21.2
AM	126.600	124.767	37.400	40.800	170.17	31.200	31.300	3.3
AS	126.367	125.567	23.100	26.700	46.23	83.200	83.000	112.8
BI	267.267	269.867	101.100	101.100	281.23	31.700	31.400	13.4
BM	392.633	386.767	136.000	147.700	378.10	25.200	26.200	25.1
BS	332.200	335.467	136.900	141.300	288.23	39.000	37.500	16.7
CI	256.333	240.867	95.700	97.200	156.93	40.400	41.100	23.8
CM	253.000	256.067	96.500	95.400	----	55.000	53.000	49.4
CS	202.200	195.967	73.800	78.700	137.57	42.900	42.500	38.7
DI	465.067	475.600	251.300	247.900	217.93	73.200	63.300	17.3
DM	465.533	461.567	277.500	276.700	84.03	39.400	37.100	91.3
DS	459.467	452.300	233.200	235.700	----	74.500	68.400	87.5
EI	489.367	468.167	245.800	228.900	57.27	99.500	97.000	181.3
EM	557.400	558.600	336.500	333.400	----	67.200	61.600	252.1
ES	556.200	528.367	288.800	282.600	687.87	82.400	82.100	42.4
FI	412.900	402.833	195.700	189.300	240.03	91.800	88.900	16.0
FM	456.067	443.067	210.800	211.600	459.27	91.500	94.700	225.0
FS	451.367	436.667	319.200	262.500	314.27	57.200	60.700	81.4
GI	403.467	374.767	116.100	115.100	68.67	144.600	136.900	63.2
GM	452.267	462.567	185.800	186.900	462.67	101.100	93.000	41.4
GS	588.700	580.900	298.800	315.900	217.97	77.100	74.100	40.4
HI	496.667	473.567	187.800	184.500	231.10	128.500	132.600	57.9
HM	962.000	983.667	399.800	397.100	121.67	128.800	128.100	166.0
HS	717.367	718.600	305.800	305.100	70.33	136.500	126.500	343.3
II	513.067	460.067	775.300	849.700	574.37	88.900	89.100	11.0
IM	408.467	420.367	214.600	213.600	855.37	61.700	63.500	22.6
IS	653.667	662.567	323.900	321.600	247.08	60.100	65.600	148.4
JI	203.167	150.400	509.900	502.500	328.53	69.800	69.700	92.5
JM	224.267	209.833	328.200	106.600	1280.70	87.400	89.600	62.2
JS	610.300	644.767	338.800	355.000	835.40	58.900	59.300	92.7
KI	743.467	728.667	436.700	467.600	580.97	56.900	54.800	75.5
KM	558.567	618.633	351.400	311.900	318.00	67.000	64.500	139.2
KS	231.900	211.333	610.900	593.800	114.73	73.300	70.600	106.2

En muestra total y en el concentrado magnético de las playas H, I y K se observan los valores más grandes sobre la línea de costa a excepción de KS donde la susceptibilidad magnética presenta valores relativamente más pequeños (231.9 y 211.3 SI en  $X_{bf}$  y  $X_{af}$  respectivamente). En general se observa que los sedimentos de los concentrados no magnéticos presentan valores de un orden más pequeños que las muestras de concentrado de minerales magnéticos y una tendencia creciente en dirección Este. En muestra total se identifica a la playa H como la localidad de mayor susceptibilidad magnética, y sobresale la mesoplaya con valores del orden de las mil unidades (Fig. 27). Para las arenas de concentrados magnéticos se observa una ligera atenuación del parámetro susceptibilidad magnética respecto de las muestras totales donde la infraplaya de I y la supraplaya de K son las zonas sobresalientes. Para las arenas de concentrados magnéticos se identificó un decremento sustancial de los valores de susceptibilidad magnética, los cuales en promedio no alcanza 80 ( $SI \times 10^{-5}$ ).

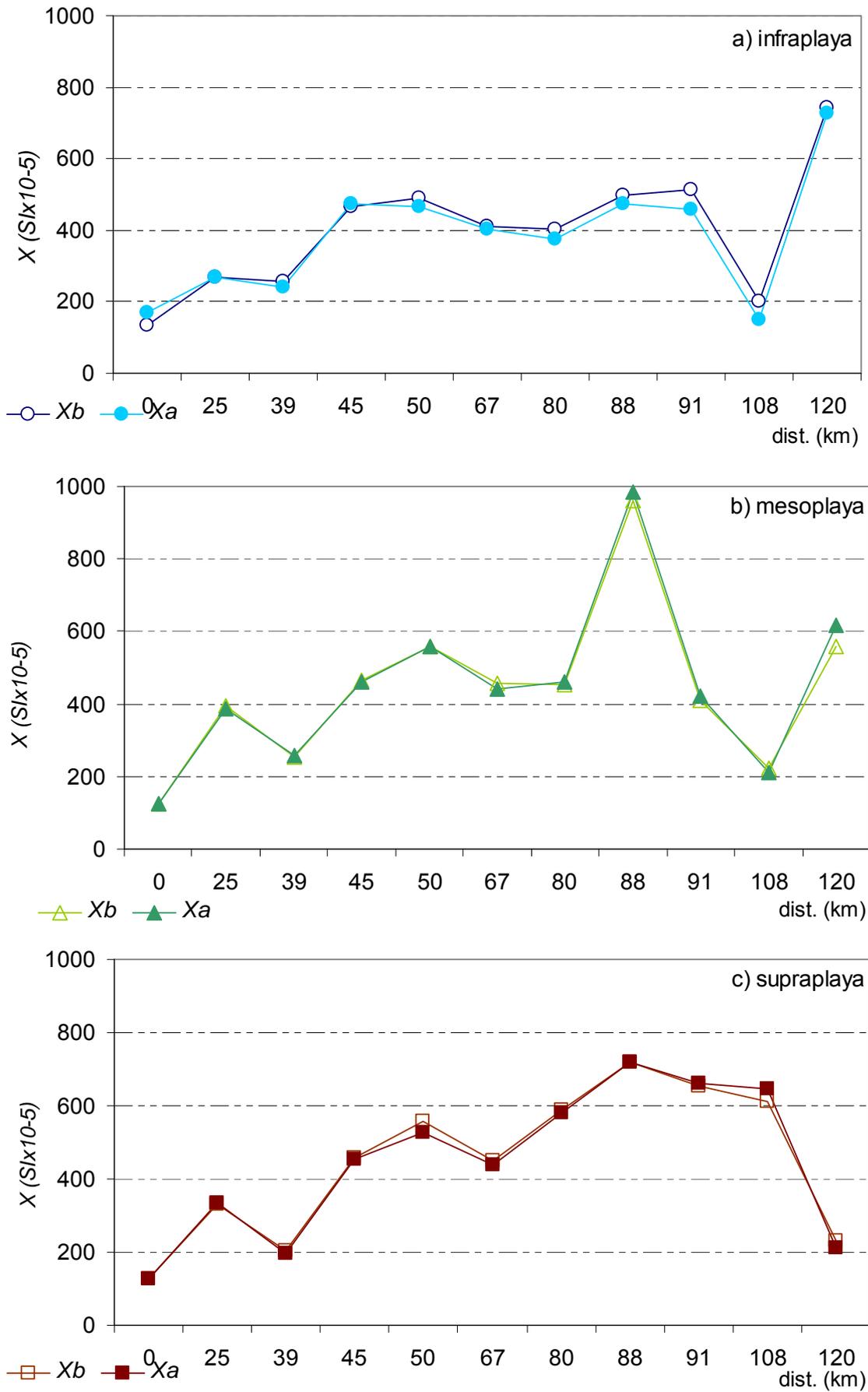


Figura 27. Susceptibilidad magnética en muestra total.

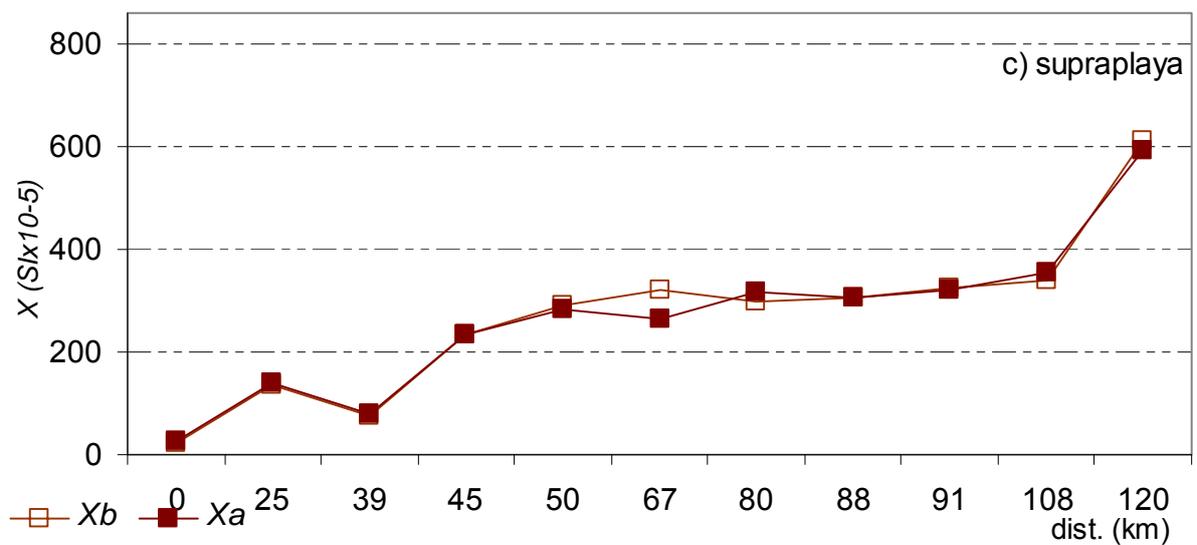
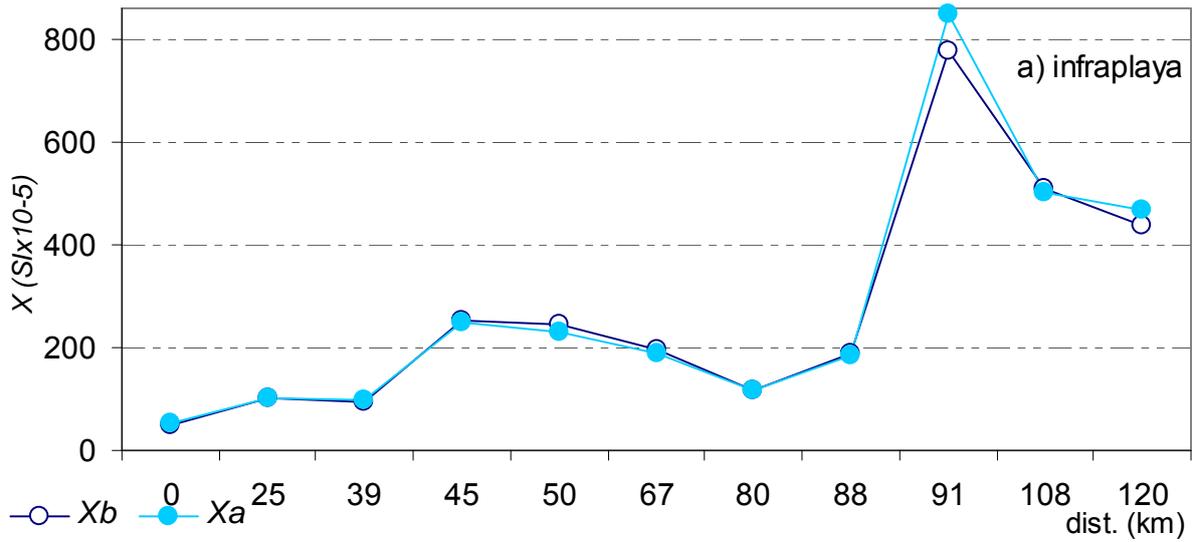


Figura 28. Susceptibilidad magnética en concentrado magnético.

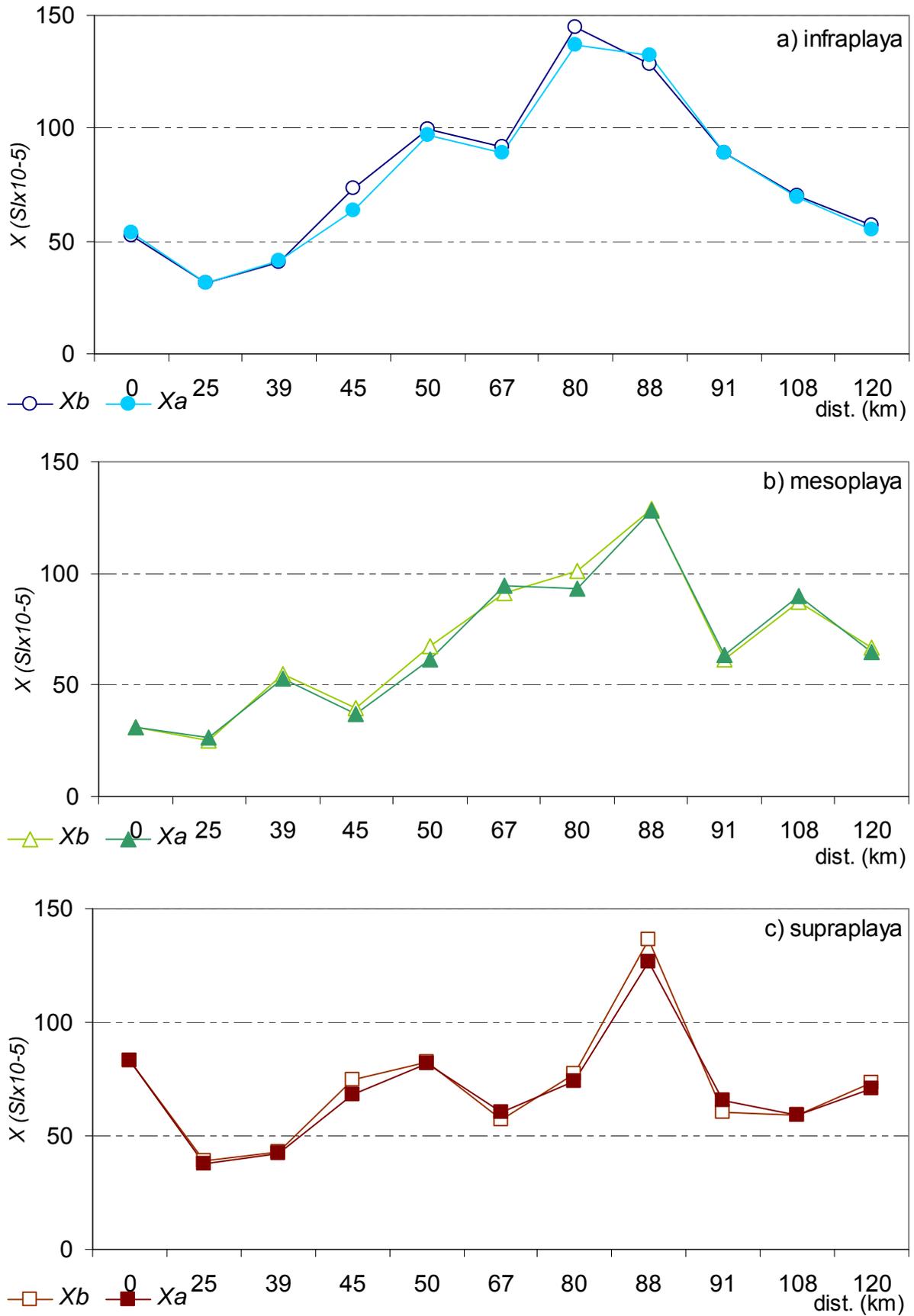


Figura 29. Susceptibilidad magnética en concentrado no magnético.

Se tienen correlaciones significativas en la muestra total del orden de 0.36 para  $X_{bf}$  vs. Lv y una  $r = -0.55$  para  $X_{bf}$  vs. Lp. También una  $r = -0.52$  entre  $X_{af}$  vs. Lp manifestando así que, la susceptibilidad magnética de las arenas analizadas se debe principalmente a la contribución que hacen los fragmentos de rocas de origen volcánico. Sí la cantidad de Lv se incrementa, el contenido de Lp decrece. Para el concentrado magnético se tienen cinco correlaciones significativas (tres negativas y dos positivas) entre la susceptibilidad magnética y los parámetro petrológicos como lo muestra la tabla 11.

Tabla 11. Correlación de susceptibilidad magnética en concentrado magnético vs. petrología.

	Qm	Ft	Lv	Lp	MP	$X_{bf}$	$X_{af}$
Qm	1.00						
Ft	0.51	1.00					
Lv	-0.64	-0.48	1.00				
Lp	0.16	0.08	-0.49	1.00			
MP	-0.21	-0.39	-0.18	-0.42	1.00		
$X_{bf}$	<b>-0.51</b>	<b>-0.46</b>	<b>0.53</b>	<b>-0.58</b>	<b>0.41</b>	1.00	
$X_{af}$	<b>-0.52</b>	<b>-0.45</b>	<b>0.53</b>	<b>-0.55</b>	<b>0.38</b>	0.98	1.00

Se observa que los máximos valores de la susceptibilidad magnética se asocian con el contenido de minerales de origen volcánico, así como al enriquecimiento de minerales pesados. Se infiere un mayor grado de erosión en la zona del sureste ya que la remoción preferencial de minerales ligeros sucede durante el lavado y relavado de éstos a lo largo de su recorrido desde la roca madre hasta la zona de depósito. Persisten los minerales de mayor densidad que en este caso se concentran en las playas del extremo sureste de Colima y son los minerales de color oscuro y de mayor contenido magnético que es inferido por los valores de susceptibilidad magnética mayores, además poseen densidades más altas que las arenas de la zona noroeste.

## 8.2 Magnetización Remanente Natural

La intensidad de magnetización remanente natural (MRN) medida abarca dos ordenes de magnitud en la muestra total desde 3.33 (A/m) en playas donde abundan minerales de colores claros, de menor densidad y menor susceptibilidad magnética (AM, BI, II) hasta 343.33 y 252.07 (A/m) en las zonas de playas HS y EM respectivamente. En el concentrado magnético la MRN tiene valores más elevados que la muestra total además incluye tres órdenes de magnitud que inicia con 46.23 (A/m) en la supraplaya de A, 687.87 (A/m) en la supraplaya de E y 1280.70 (A/m) en la mesoplaya de J, es decir, estos valores van creciendo en dirección de la cuenca del río Coahuayana mientras que en las mismas localidades pero de la muestra total éstas presentan valores pequeños (25.13, 42.43 y 62.23 (A/m) respectivamente) que es característico de elementos diamagnéticos, es decir, la facilidad con que éstos se pueden magnetizar es escasa y contraria a la facilidad con que se magnetizan los minerales ferromagnéticos que abundan en las muestras de concentrado magnético. Para los concentrados magnéticos y no magnéticos en muestras de infraplaya la MRN manifiesta patrones similares a los de la susceptibilidad magnética con valores elevados y crecientes en dirección sureste. Existen correlaciones significativas y positivas entre la MRN y la  $X$  en alta y baja frecuencia en la muestra total con  $r = 0.44$  (Fig. 30a). También positiva pero en menor proporción se tiene una correlación significativa entre MRN del concentrado magnético vs. MP con valor de  $r = 0.41$  (Fig. 30b). Para la MRN vs. el índice de alteración de plagioclasas la correlación es negativa (Fig. 30c), por lo cual entre más elevado sea el valor del índice de alteración de plagioclasa (IAP) en una muestra menor es la capacidad que ésta tiene para adquirir una MRN.

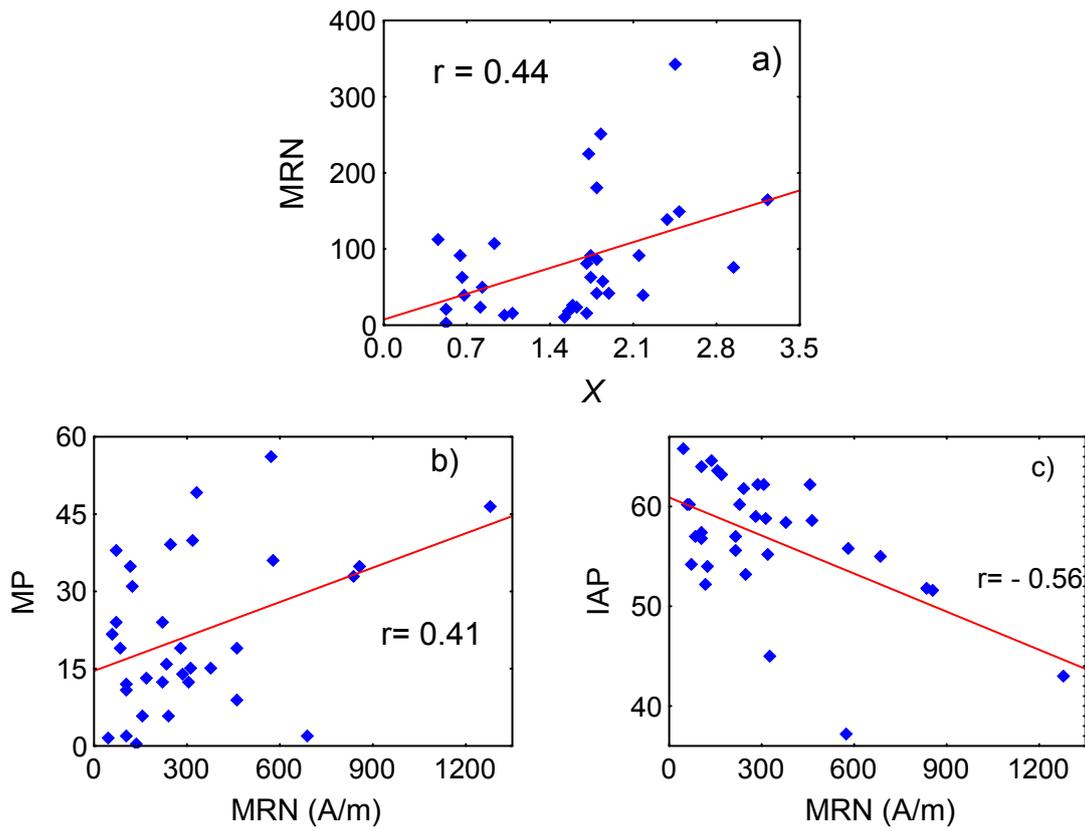


Figura 30a) Correlación de MRN vs. X b) MRN vs. MP c) MRN vs. IAP



## 9. INTERACCIÓN ENTRE TEXTURA Y MAGNÉTISMO DE LAS ARENAS DE PLAYA

El tamaño de grano dominante de las arenas de playas se correlaciona significativa y positivamente con los concentrados de minerales magnéticos y aunque la dispersión entre los parámetros es elevada se puede decir que las correlaciones entre  $M_z(\phi)$  vs.  $X$ ,  $M_z(\phi)$  vs.  $MP$  y  $M_z(\phi)$  vs.  $MnO$  son crecientes y similares. Estas relaciones indican una mayor influencia de rocas volcánicas con minerales magnéticos cuyos valores de susceptibilidad magnética resultaron ser más grandes en las arenas finas (Fig. 31a). El hecho de que los sedimentos incrementen su susceptibilidad magnética conforme decrece el tamaño de grano también ha sido reportado en trabajos como los de Dearing *et al.*, 1981, Kasper-Zubillaga *et al.*, 2007.

La correlación negativa del parámetro  $M_z(\phi)$  oscila desde -0.72 con  $K_2O$  hasta -0.46 cuando se correlaciona con  $\sigma_1(\phi)$ , pasando por el  $SiO_2$  e identificando un decremento de ésta variable conforme aumenta el valor de  $M_z(\phi)$  (Fig. 31b), pues los granos más gruesos están integrados por feldespatos alcalinos y fragmentos de rocas con incrustaciones de feldespato potásico.

Para  $M_z(\phi)$  vs.  $\sigma_1(\phi)$  la correlación es negativa y del orden de -0.46. Ésta tendencia negativa no solo se presenta en las arenas de las playas de Colima sino que también han sido reportadas en análisis de arenas de playas, de dunas en Sonora, México (Kasper-Zubillaga y Carranza-Edwards, 2005), en arenas de duna, playa y ríos en Tamaulipas, México (Kasper-Zubillaga, *et al.*, en prensa) así como, en arenas de dunas de Nueva Zelanda (Kasper-Zubillaga *et al.*, 2007). Lo que indica un comportamiento característico de arenas finas con buena clasificación posiblemente debido a la erosión y selección que generan las olas, el viento y la trayectoria que recorren los sedimentos antes de llegar al sitio de depósito.

Entre más pequeño es el tamaño de partícula (en este caso arenas fina a medias) mayor es el valor de susceptibilidad magnética, así como también mayor es el contenido de minerales pesados. El contenido de minerales pesados en las arenas de playa presenta una tendencia creciente para MRN, MnO y TiO<sub>2</sub> con  $r = 0.37, 0.65, 0.85$  en cada caso y un decremento de las variables NaO, SiO<sub>2</sub>, Ski (Fig. 32) conforme aumenta el contenido de MP.

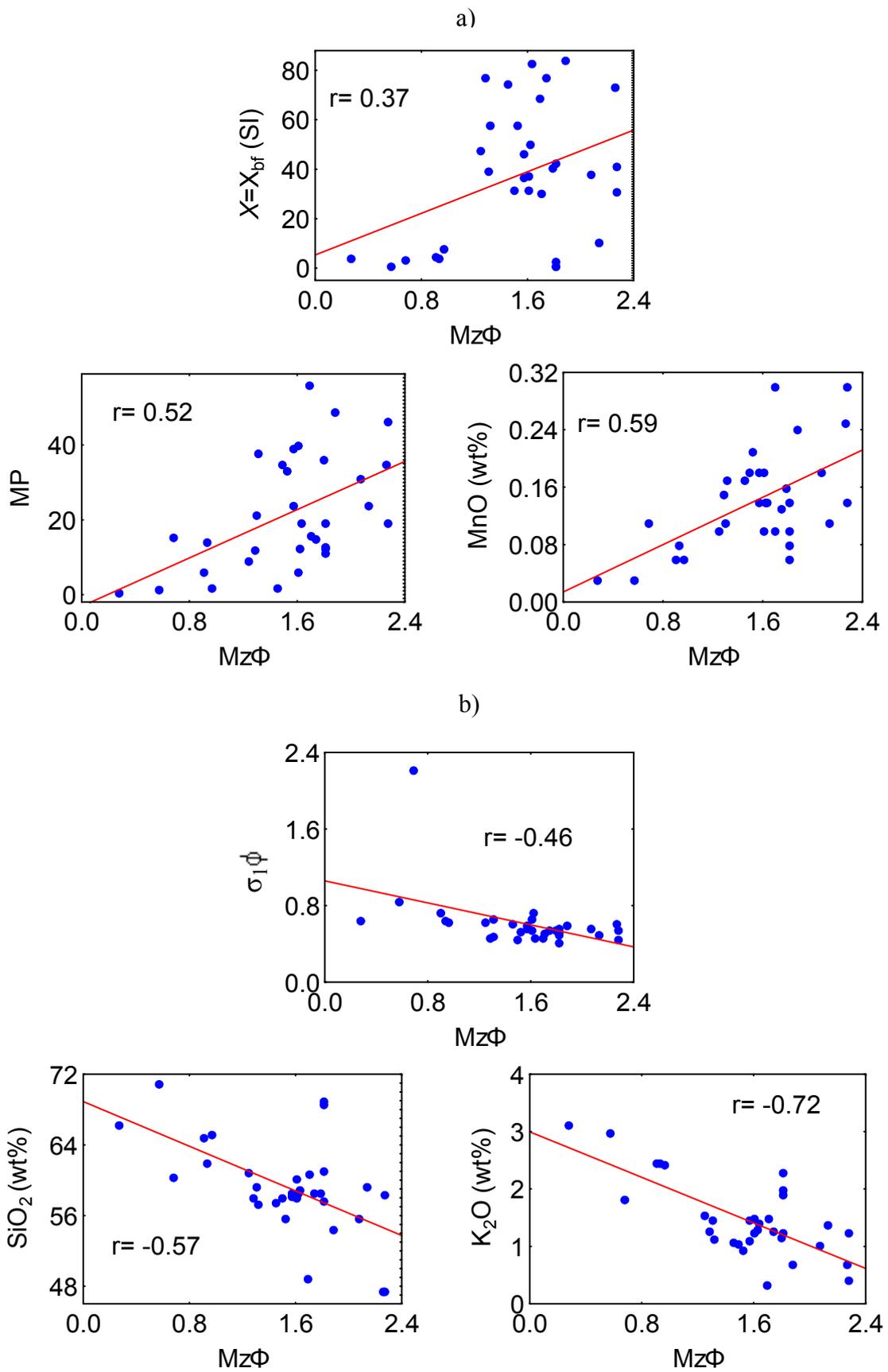


Figura 31a) Correlaciones positivas de  $Mz(\phi)$  vs.  $X_{bf}$ , MP, MnO.  
 11b) Correlaciones negativas de  $Mz(\phi)$  vs.  $\sigma_1(\phi)$ ,  $SiO_2$  y  $K_2O$ .

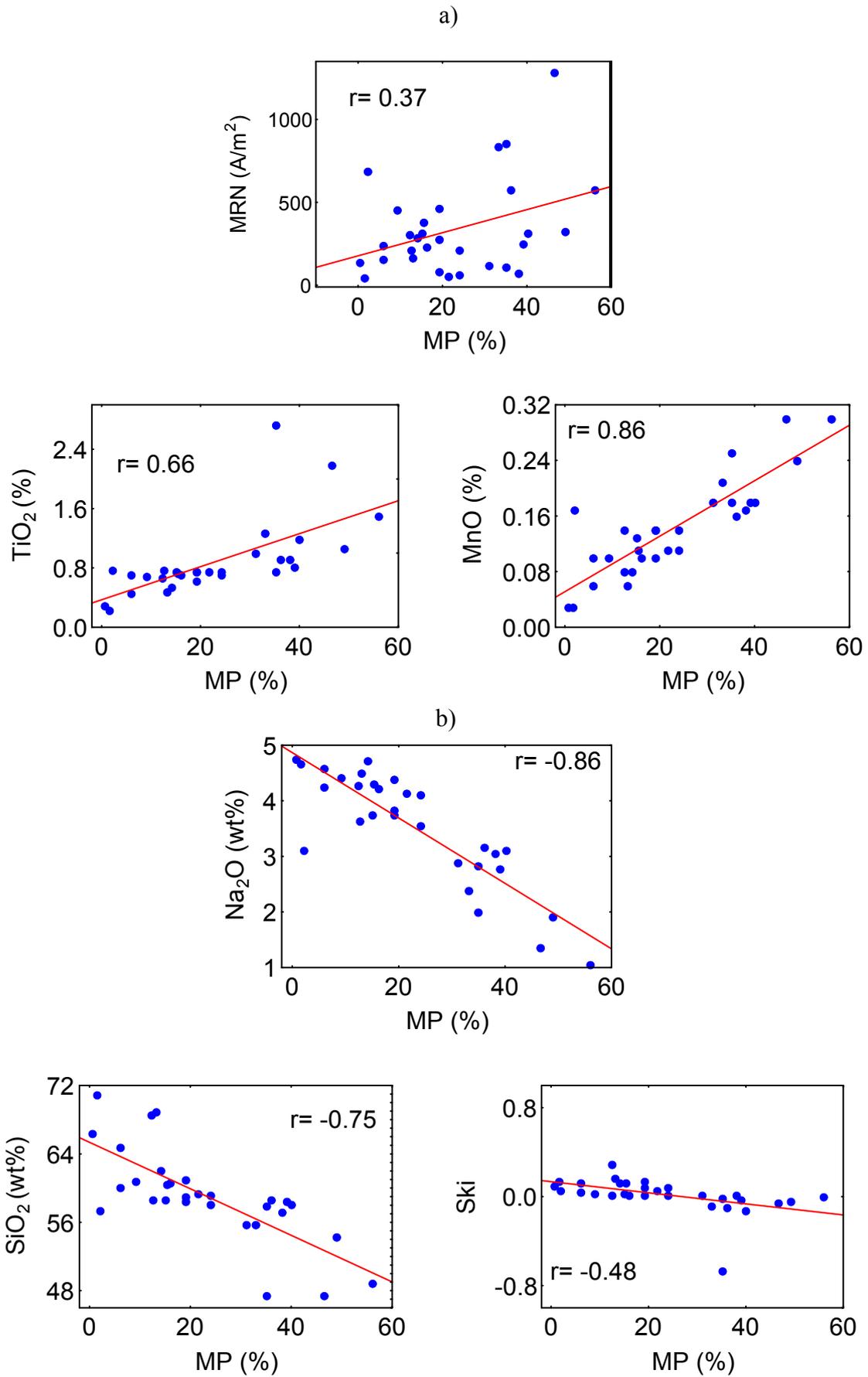


Figura 32a) Correlaciones positivas entre MP vs. MRN,  $TiO_2$ , MnO.  
 32 b) Correlaciones negativas entre MP vs.  $Na_2O$ ,  $SiO_2$  y Ski.

## **10. CONCLUSIONES**

### **Característica Textural de los Sedimentos**

- Los sedimentos a lo largo de la costa de Colima presentan tamaños de arenas medias a finas y su clasificación oscila entre bien clasificadas a moderadamente bien clasificadas. La tendencia de menor tamaño de grano y mejor clasificación en las arena es en dirección sureste, y por consiguiente las arenas de mayor grado de intemperismo preservan la mayor cantidad y mejor calidad los minerales más oscuros y se ubican en el extremo sureste de la costa de Colima.
- Las arenas de las playas de la cuenca del río Cihuatlán tienen un mayor contenido de minerales claros, menor índice de alteración y procedencia que el resto de las arenas de las playas de las otras dos cuencas y hace suponer un menor grado de intemperismo. Se infiere una roca fuente cercana a la zona de sedimentación y por ende una menor trayectoria que recorren los sedimentos desde la roca fuente hasta la zona de depósito indicando que el desgaste de los minerales se realiza principalmente sobre la línea de costa y no en el recorrido que realizan los sedimentos antes de depositarse.

### **Petrología y Geoquímica**

- Las mayores concentraciones de minerales pesados se dan en la zona Este, en las arenas de las cuencas de los ríos Armería y Coahuayana al igual que los mayores índices de procedencia y alteración que hace suponer rocas volcánicas como parte de las rocas fuentes de dichas arenas sin que las rocas sedimentarias más cercanas a la línea de costa sean significativamente abundantes como parte del aporte sedimentario de la zona. Los cuerpos plutónicos en las playas también están siendo erosionados y depositados en forma de arenas finas y oscuras.

- La composición geoquímica de los dos concentrados no presenta variaciones significativas entre sí, con excepción del Fe y Mg ya que en los concentrados magnéticos es un orden mayor que en el concentrado no magnético y en la muestra total. También se tiene una variación de un orden de magnitud en contenidos de sílice y magnesio.
- El área de supraplaya de B se identifica como una zona de playa totalmente independiente de las áreas analizadas. Presenta el mayor tamaño de clastos, es decir son arenas gruesas ( $Mz\phi = 0.68\phi$ ), la peor clasificación ( $\sigma_1\phi = 2.21\phi$ ), el menor grado de simetría ( $Ski = -0.66$ ), se sesga hacia los sedimentos gruesos, el menor valor de curtosis ( $K_G = 0.48$ ), la mayor contribución de cuarzo monocristalino está en éste sitio ( $Q_m = 28.5$ ) así como el mayor contenido de feldespato total, estroncio, índice de madurez e índice de procedencia y el más bajo contenido de fragmentos líticos totales.

### **Susceptibilidad Magnética**

- La susceptibilidad magnética se incrementa en dirección sureste y se correlaciona con la intensidad de magnetización remanente natural cuyo rango de valores aumenta en la misma dirección y se relaciona con mayores concentraciones de minerales oscuros, finos, mejor clasificados y magnéticos en las playas de las cuencas de los ríos Armería y Coahuayana, por lo cual está zona es la de mayor contribución de minerales magnéticos susceptibles a generar minerales de placer.

### **Minerales paramagnéticos, diamagnéticos y ferromagnéticos**

Las arenas de playa de la cuenca del río Cihuatlán son principalmente constituidas de minerales paramagnéticos y en una proporción inferior por minerales diamagnéticos, ambas abundancias decrecen hacia el extremo sureste de la costa. Son minerales ferromagnéticos quienes dominan las arenas de la cuenca del río Coahuayana.

### **Parámetros sedimentológicos y magnéticos de arenas de playa**

- Las arenas finas ricas en minerales pesados y altas concentraciones de Fe, Ti y Mn, se relacionan con valores altos de susceptibilidad magnética y magnetización remanente natural. Estos valores se asocian con la influencia de rocas volcánicas de las cuencas Armería y Coahuayana.



## 11. BIBLIOGRAFÍA

- Alekseeva, V.A., Hounslow, M.W., Ananyev, G.S., 2003, Characterization of sediment sources using discrete and included magnetic particles in the Upper Don River Basin, Russia: a comparison to petrographic methods: *Geophysical Research Abstracts* 5.
- Alva-Valdivia, L., M., Vaga-Carrillo, J., J., Urrutia-Fucugauchi, J., 1992, Estudio de minerales de fierro y titanio y magnetismo de rocas en el distrito ferrífero El Encino, Jalisco, México: *Geofísica Internacional*, 32, 175-199.
- Anfuso, G., Achab, M., Cultrone, G., López-Aguayo, F., 1999, Utility of heavy minerals distribution and granulometric analyses in the study of coastal dynamic: Application to the littoral between Sanlúcar de Barrameda and Rota (Cadiz, southwest Iberian Peninsula): *Boletín del Instituto Español de Oceanografía*, 15(1-4):243-250.
- Arribas, J., Critelli, S., Le Pera, E., Tortosa, A., 2000, Composition of modern stream sand derived from a mixture of sedimentary and metamorphic source rocks (Henares River, Central Spain): *Sedimentary Geology*, 133, 27-48.
- Astiz, L., Kanamori, H., 1984, An earthquake double in Ometepec, Guerrero, Mexico: *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 34, 24-45.
- Bandy, W., Mortera-Gutierrez, C., Urrutia-Fucugauchi, J., Hilde, T.W.C., 1995, The subducted Rivera-Cocos plate boundary : Where is it, what is it, and is it relationship to the Colima rift?: *Geophysical Research Letters*, 22, 3075-3078.
- Basu, A., 1976, Petrology of Holocene fluvial sand derived from plutonic source rocks: implication for paleoclimatic interpretation: *Journal of Sedimentary Petrology*, 46(3), 694-709.
- Basu, A., 1985, Influence of climate and relief on composition of sands released at source areas. In: Zuffa, G.G. (Ed), *Provenance of Arenites* 1-18. D. Reidel, Dordrecht, 1-18.

- Basu, A., Molinaroli, E., 1989, Provenance characteristics of detrital opaque Fe-Ti oxide minerals: *Journal of Sedimentary Petrology*, 59(6), 992-934.
- Berquist, C.R., Fishler Jr., C.T., Calliari, L.J, Dydak, S.M., Ozalpaslam, H., Skrabal, S.A.,1990, Heavy-Minerl concentrations in sediments of the inner continental shelf. In: Berquist Jr., C. R. (Ed.), *Heavy-Mineral Studies-Virginia Inner Continental Shelf:Virginia Division of Minerals Research*, 103, 31-94 pp.
- Bhongsuwan, t., Ponathong, P., 2002, Magnetic characterization of the Thung-Yai Redbed of Nakhon Si Thammarat Province, Southern Thailand and Magnetic Relationship with the Khorat Redbed: *Science Asia*, 28, 277-290.
- Bird, E., 2000, *Coastal Geomorphology: An Introduction*, Chichester: England, John Wiley & Sons, Ltd., 322 pp.
- Bleil, U., Smith, B., 1988, Petrology of magnetic oxides at site 417: Initial reports of the Deep Sea Drilling Project, LI, LII, LII, Washington (U.S. Government Printing Office), 1411-1428.
- Bloemendal, J., Lamb, B., King, J., 1988, Paleoenvironmental implications of Late Quaternary sediment cores from the aestern equatorial Atlantic: *Peleoceanography*, 3, 61-87.
- Böhnel, H., Alva-Valdivia, L., González-Huesca, S., Urrutia-Fucugauchi, J., Moran-Zenteno, D., Schaaf, P., 1988, Paleomagnetic data and accretion of the Guerrero Terrane, Southern Mexico Continental Margin. En: J. W. Hillhouse (Ed.), *Deep Structure and Past Kinematics of Accreted Terranes*, *Geophys. Monograph 50, IUGG*, 5, 73-92.
- Booth, C.,A., Walden, J., Neal, A., Smith, J.,P., 2005, Use of mineral magnetic concentration data as a particle size proxy: A case study using marine, estuarine and fluvial sediments in the Carmarthen Bay area, South Wales, U.K.:*Science of the Total Environment*, 347, 241-253.

- Brachfeld, S., Banerjee, S.,K., 2000, Rock-magnetic carriers of century-scale susceptibility cycles in glacial-marine sediments from the Palmer Deep, Antarctic Peninsula: Earth and Planetary Science Letters, 176, 443-455.
- Butler, R., 1992, Paleomagnetism: Blackwell Scientific, Cambridge, 319 pp.  
URL: <http://www.geo.arizona.edu/Paleomag/book/>
- Cabrera-Ramírez, M., Carranza-Edwards, A., 2002, The Beach Environment in Mexico as a Potential source of Placer Minerals: Marine Georesources and Geotechnology, 20, 187-198.
- Carmichael, R.S., 1982, Magnetic properties of minerals and rocks. In CRC Handbook of Physical Properties of Rocks: Carmichael RS. (ed.). CRC Press: Boca Raton, FL., 345 pp.
- Carranza-Edwards, A., 2001, Grain size and sorting in moder beach sands: Journal of Costal Reseach, 17(1), 38-52.
- Carranza-Edwards, A., Centeno-García, E., Rosales-Hoz, L., Lozano-Santa Cruz, R., 2001, Provenance of beach gray sands from western Mexico: Journal of South American Earth Sciences, 14, 291-305.
- Carranza-Edwards, A., Caso-Chávez M., 1994, Zonificación del perfil de playa. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, 2, 26-32.
- Carranza-Edwards, A., Rosales-Hoz, L., 1994, Geochemistry of two Mexican tropical basins in an active margin and their influence on littoral sediments: Journal of South American Earth Sciences, 8, 221-228.
- Carranza-Edwards, A., Rosales-Hoz, L., 1995, Grain-size trends and provenance of southwestern Gulf of México beach sands: Canadian Journal of Earth Sciences, 32, 2009-2014.

- Carranza-Edwards, A., Rosales-Hoz, L., 1996, A reconnaissance study of carbonates in Mexican Beach sands: *Sedimentary Geology*, 101, 261-268.
- Carranza-Edwards, A., Rosales-Hoz, L., Urrutia-Fucugauchi, J., Sandoval-Fortanel, A., De la Garza, E.M., Lozano-Santacruz, R., 2005. Geochemical distribution pattern of sediments in an active continental shelf in southern Mexico. *Continental Shelf Research*, 25 (4), 521-537.
- CENAPRED, 2006, Informe anual de riesgos, Atlas Nacional de Riesgos, Centro Nacional de Prevención de Desastres, 149 pp.
- CNA, 2003, Registro de datos meteorológicos, Reporte técnico, Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA, 2009, Catálogo histórico de temperatura y precipitaciones en la República Mexicana: CONAGUA. Comisión Nacional del Agua.
- URL:[http://smn.conagua.gob.mx/index.php?option=com\\_content&view=article&id=12&Itemid=10](http://smn.conagua.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=12&Itemid=10)
- Cook, P.J., Fannin, N.G. T., Hull, J. H., 1992, The physical exploitation of shallow seas. In: Hsü, K. L., Thide, J. (Eds.), *Use and Misuse of the Seafloor*. John Wiley & Sons, 157-180 pp.
- Copjaková, R., Sulovský, P., Paterson, B.A., 2005, Major and trace elements in pyrope-almandine garnets as sediment provenance indicators of the Lower Carboniferous Culm sediments, Drahany Uplands, Bohemian Massif: *Lithos* 82, 51–70.
- Crickmore, M.J., Tazioli, G.S., Appleby, P.G., Oldfiel, F., 1990, The use of Nuclear Techniques in Sediment Transport and Sedimentation Problems. Technical Document, UNESCO, IHP-III, Project 5.2, 170 pp.
- Critelli S., Le Pera, E., Ingersoll, R.V., 1997, The effects of source lithology, transport, deposition and sampling scale on the composition of southern California sands: *Sedimentology*, 44, 653-671.

- Da Silva, M.A.M., 1979, Provenance of heavy minerals in beach sands, southeastern Brazil: from Rio Grande to Chuí (Rio Grande do Sul State): *Sedimentary Geology*, 24, 133-148.
- Dearing, J., 2000, Natural magnetic traces in fluvial geomorphology. In: Foster D. L. (Ed.), *Traces in Geomorphology*: John Wiley, Chichester. 57-82.
- Dearing, J., Elner, J., Hapley-Wood, M., 1981, Recent Sediment Flux and Erosional Processes in a Welsh Upland Lake-Catchment Based on Magnetic Susceptibility Measurements: *Quaternary Research*, 16, 356-372.
- Dunlop, D., Özdemir, Ö., 1997, *Rock-Magnetism, Fundamentals and Frontiers*: Cambridge University Press, Cambridge, 573 pp.
- Egli, R., Spassov, S., 2003, A novel method for the identification and characterization of magnetic sources in sediments: *Geophysical Research Abstracts* 5.
- Enríquez-Hernández, G., 2003, Criterios para evaluar la aptitud recreativa de las playas en México: una propuesta metodológica: *Gaceta Ecológica*. Instituto Nacional de Ecología, 68, 55-68.
- Fedo, C. M., Nesbitt, H. W., Young, G. M., 1995, Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for weathering conditions and provenance. *Geology*, 23, 921-924.
- Fernández-Eguiarte, A., Gallegos-García, A., Zavala-Hidalgo, J., 1992a. *Oceanografía Física 1 (Masas de Agua y Mareas de los Mares Mexicanos)*. Atlas Nacional de México (Sheet IV.9.1 Summer): Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Fernández-Eguiarte, A., Gallegos-García, A., Zavala-Hidalgo, J., 1992b, *Oceanografía Física 1 (Masas de Agua y Mareas de los Mares Mexicanos)*. Atlas Nacional de México (Sheet IV.9.2 Summer): Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

- Fernández-Eguiarte, A., Zavala-Hidalgo, J., Romero-Centeno R., 2010a, Digital Climatic Atlas of Mexico. CD Proceedings ISSN:1314-0604. Centro de Ciencias de la Atmósfera. Coordinación de la Investigación Científica, UNAM. Publicación en línea.  
[http://www.cartography-gis.com/pdf/44\\_Fernandez\\_Eguiarte\\_Mexico\\_paper.pdf](http://www.cartography-gis.com/pdf/44_Fernandez_Eguiarte_Mexico_paper.pdf)
- Fernández-Eguiarte, A., Zavala-Hidalgo, J., Romero-Centeno R., 2010b, Atlas Climático Digital de México. Evaluado positivamente por pares académicos en 2009 y 2010, dentro del marco del megaproyecto SIBA-IMPULSA-UNAM. Centro de Ciencias de la Atmósfera. Coordinación de la Investigación Científica, UNAM. Publicación en línea.  
<http://uniatmos.atmosfera.unam.mx/>
- Folk, R. L., 1980, Petrology of Sedimentary Rocks: Austin, Texas, Hemphill Publishing Company, 182 pp.
- Frihy, O.E., Komar, P.D., 2003, Patterns of erosion/sedimentation, heavy mineral concentration and grain size to interpret boundaries of littoral sub-cells of the Nile Delta, Egypt: Marine Geology, 199, 27–43.
- Frihy, O.E., Komar, P.D., 2003, Long-term shoreline changes and the concentration of heavy minerals in beach sands of the Nile Delta, Egypt: Marine Geology, 115, 253-261. DOI:10.1016/0025-3227(93)90054-Y.
- Fuentes-Farias, A.L., Garduño, V.H., Gutiérrez-Ospina, G., Pérez-Cruz, L., Melendez, E., Urrutia-Fucugauch, J., 2010. Reconnaissance study of Colola and Maruata, the nesting beaches of marine turtles along the Michoacan coast in southern Mexico. *Gofisical International*, 49, 201-212.
- Fujimoto, K., Kikawa, E., 1989, Alteration of titanomagnetites and its related magnetic properties in the Noya geothermal area, Central Kyushu, Japan: *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 41, 39-64.

- Galicia-Pérez, M. A., Martínez-Venegas, R., Gaviño-Rodríguez, J. H., Torres-Orozco, E., Quijano-Scheggia, S., 2007, Riesgo hidrometeorológico en la región de Manzanillo, Colima. En XVI Congreso Mexicano de Meteorología, Ed. Internacional, Veracruz, México. 356 pp.
- Gawali, P.B., Basavaiah, N., Hanamgond, P.T., 2010, Mineral magnetic properties of sediments of beaches, Redi-Vengurla Coast, central west coast of India: a seasonal characterization and provenance study: *Journal of Coastal Research*, 26 (3), 569-579. DOI:10.2112/08-1111.1
- Gent, M.R., Alvarez, M.N., Iglesias, J., M.G., Alvarez J.T., 2005, Offshore occurrences of heavy-mineral placer, Northwest Galicia, Spain: *Marine Georesources & Geotechnology*, 23, 39-59.
- Grandjean, P., Cappetta, H., Albarede, F., 1988, The REE and Nd of 40-70 Ma old fish debris from the West-African platform: *Geophysical Research*, 15, 389-392.
- Grantham, J. H., Velbel, M.A., 1987, The influence of the climate and topography on rock-fragment abundance in modern fluvial sands of the southern Blue Ridge Mountains, North Carolina: *Journal of Sedimentary Petrology*, 60, 940-951.
- Grigsby, J., D., 1990, Detrital Magnetite as a provenance indicator: *Journal of Sedimentary Petrology*, 60, 940-951.
- Gujar, A.R., Ambre, N.V., Mislankar, P.G., 2007, Onshore heavy placers of south Maharashtra, central west coast of India, in: Loveson, V.J., Sen P.K., Sinha, A., (eds), National Seminar on Exploration, Exploitation, Enrichment and Environment of Coastal Placer Minerals (PLACER, 2007). New Delhi, India: Macmillan, 3-26.
- Guerra-García, R.F., Sosa-Fernández, M., Rivas-Rodríguez, L., 2009, Evolución texturo-composicional de la arena de playas del Este de la Habana, Cuba. *Serie Oceanológica*, 6, Instituto de Oceanología, La Habana.

- Hatfiel, R.G., Cioppa, M.T., Trenhaile, A. S., 2010, Sediment sorting and beach erosion along a coastal foreland: Magnetic measurements in Point Pelee National Park, Ontario, Canadá: *Sedimentary Geology*, en prensa.
- Herzog, M., Böhnell, H., Kohnen, H., Negendank, J.F.W., 1988, Variation of magnetic properties and oxidation state of titanomagnetites within selected alkali-basalt lava flows of the Eifel-Area, Germany: *Journal of Geophysics*, 62, 180-192.
- Hesse, P., Stoltz, J. F., 1999, Bacterial magnetite and the Quaternary record. In: Maher, B. A., Thompson, R. (Eds.), *Quaternary Climates, Environments and Magnetism*: Cambridge University Press, 163-198 pp.
- Holail, H.M., Moghazi, A.K.M., 1998, Provenance, tectonic setting and geochemistry of greywackes and siltstones of the Late Precambrian Hammamat Group, Egypt: *Sedimentary Geology*, 116, 227-250.
- Hossain, A., 1975, The occurrence of polyframboidal pyrite in a beach sand deposit, Gox's Bazar, Bangladesh: *American Mineralogist*, 60, 157-158.
- Hounslow, M.W., 2003, Provenance characterization using magnetic mineral inclusions in clastic silicates: an examination of constraints and quantitative methodology: *Geophysical Research Abstracts* 5.
- Hounslow, M.W., Morton, A.C., 2004, Evaluation of sediment provenance using magnetic mineral inclusions in clastic silicates: comparison with heavy mineral analysis: *Sedimentary Geology*, 171, 13-36.
- Hu, S., Wang, S., Erwin, A., Ji L., 2000, Environmental mechanism of magnetic susceptibility changes of lacustrine sediments from Lake Hulun, China: *Science in China*, 43, 534-540.
- Ibbeken, H., Schleyer, R., 1991, *Source and Sediment*, Springer-Verlag, Berlin 286 pp.

- Inman, D.L., Ewing, G.C., Corliss J.B., 1966, Coastal sand dunes of Guerrero Negro, Baja California, Mexico: Geological Society of America, Bulletin 77, 787–802.
- INEGI, 1970a, Carta Geológica E13-B42, Esc. 1:50 000: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- INEGI, 1970b, Carta Geológica E13-B43, Esc. 1:50 000: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- INEGI, 1970c, Carta Geológica E13-B53, Esc. 1:50 000: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- INEGI, 1970d, Carta Geológica E13-B54. Esc. 1:50 000: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- INEGI, 1970e, Carta Geológica E13-B64. Esc. 1:50 000: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- INEGI, 1989a, Colima en síntesis: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 30 pp.
- INEGI, 1989b, Carta Fisiográfica. Esc. 1:1000 000: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- INEGI. 1989c. Carta Geológica-Minera.Esc. 1:500 000: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática
- INEGI, 2000, XII Censo General de Población y Vivienda 2000: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 268 pp.
- Jong, E., Nestor, P.A., Pennock, D.J., 1998, The use of magnetic susceptibility to measure long-term soil redistribution: *Catena*, 32, 23-35.
- Jong, E., Pennock, D.J., Nestor, P.A., 2000, Magnetic susceptibility of soils in different slope positions in Saskatchewan, Canada: *Catena*, 40, 291-305.

- Karling, R., 1990, Magnetic diagenesis in marine sediments from the Oregon continental margin: *Journal of Geophysics Research*, 95, 4405-4419.
- Kasper-Zubillaga, J.J., Armstrong-Altrin, J.S., Carranza-Edwards, A., Morton-Bermea, O., Lozano-Santa-Cruz, R., en prensa, Analyses of Beach, dune and river sands from the Northwestern Gulf of Mexico coast: implications for provenance Turing the dry and wet seasons, en prensa.
- Kasper-Zubillaga, J.J., Carranza-Edwards, A., 2005, Grain size discrimination between sands of desert and coastal dunes from northwestern Mexico: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 22, 383-390.
- Kasper-Zubillaga, J.J., Ortiz-Zamora, G., Dickinson, W.W., Urrutia-Fucugauchi, J., Soler-Arechalde, A.M., 2007, Textural and compositional controls on modern beach and dune sands, New, Zealand: *Earth Surface Processes and Landforms*, 32, 366-389.
- Kasper-Zubillaga, J.J., Zolezzi-Ruíz, H., Carranza-Edwards, A., Girón-García, P., Ortiz-Zamora, G., Palma, M., 2006, Sedimentological, modal analysis and geochemical Studies of desert and coastal dunes, Altar, Desert, NW, Mexico: *Earth Surface processes and Landforms*, 4, 489-508.
- King, C. A. M., 1972, *Beaches and coasts*, Arnold, 570 pp.
- Komar, P. D., 1998, *Beach Processes and Sedimentation*: New Jersey, Prentice Hall, segunda edición, 429 pp.
- Kusky, T., 2008, *The coast: Hazardous Interactions within the Coastal Environment*: Library of Congress, United States of America, 155 pp.
- Kunzendorf, H. (Ed.), 1986, *Marine Mineral Exploration* (Elsevier Oceanography Series) Elsevier, Amsterdam. 300 pp.

- Lancín, M., Carranza-Edwards, A., 1976. Estudio geomorfológico de la Bahía y de la playa Santiago en Manzanillo, Colima: Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, 2, 43-65.
- Lenoble, J. P., Auguries, C., Carbon, R., Sagest, P., 1995, Marine Mineral Occurrences and Deposits of the Economic Exclusive Zones, MARMIN: A Data Base Editions IFREMER, 274 pp.
- Le Pera, E., Critelli, S., 1997, Sourceland controls on the composition of beach and fluvial sand of the northern Tyrrhenian coast of Calabria, Italy: implications for actualistic petrofacies: *Sedimentary Geology*, 110, 81-97.
- Li, M.Z., Komar, P.D., 1992, Longshore grain sorting and beach placer formation adjacents to the Columbia River: *Journal of Sedimentary Research*, 62 (3), 429-441.
- Logachev, A.A., Zajarov, V.P., 1978, Exploración magnética. Reverté, S.A. 350 pp.
- Lohmann, C.M.F., Lohmann, K.J., 2010, Sea turtles: Navigation and Orientation: In *Encyclopedia of Animal Behavior*, 101-107.
- Love, J.J., 2000, Palaeomagnetic secular variation as a function of intensity: *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 358, 1191–1223.
- Maher, B.A., Thompson, R., Hounslow, M.W., 1999, Introduction. In: Maher, B. A., Tompson R. (Eds.), *Quaternary Climates, Environments and Magnetism*. Cambridge University, Press, 1-48.
- Mange, M.A., Otvos, E.G., 2005, Gulf coastal plain evolution in West Louisiana: Heavy mineral provenance and Pleistocene alluvial chronology: *Sedimentary Geology*, 182, 29–57.
- Martínez-Monasterio, E., Stephens, W.E., Waden, J., Dick, R.W., 2000, Weathering and abrasion of Fe-Ti oxides during rock degradation and fluvial transport: implications for sedimentary provenance studies *Journal of Geological Society*, 157, 601-613.

- McArthur, J.M., Walsh, J.N., 1984, Rare earth geochemistry of phosphorites: *Chemical Geology*, 47, 191-220.
- Melbourne, T., Carmichael, I., DeMets, C., Hudnut, K., Sánchez, O., Stock, J., Suaáez, G., Webb, F., 1997, The geodetic signature of the M8.0 October 9, 1995, Jalisco subduction Earthquake: *Geophysical Research Letters* 24(6), 715–718.
- Meynadier, L., Salomé, A.L., Allégre-Gaillardet, J., Hautevelle, Y., 2003, Magnetic parameters of river sands as trace of weathering: *Geophysical Research Abstracts* 5.
- Moreno-Casasola, P., 2004, Playas y dunas del Golfo de México. Una visión de la situación actual. En: *Diagnóstico ambiental del Golfo de México*. Caso, M., Pisanty I., Escurra E. (comp): SEMARNAT (INE)-INECOL-Harte Research Institute for Gulf of Mexico Studies, 491-520.
- Morton, A.C., 1985, A new approach to provenance studies: electron microprobe analysis of detrital garnets from Middle Jurassic sandstones from the Northern North Sea: *Sedimentology*, 32, 553–566.
- Morton, A.C., Hallsworth, C.R., 1999, Processes controlling the composition of detrital mineral assemblages in sandstones: *Sedimentary Geology* 124, 3–29.
- Nachite, D., Amri, I., Anfuso, G., Bello, E., Marocchino, E., Benavente, J., Vaccaro, C., 2005, Geoquímica de los sedimentos de playas entre Fnideq y M´diq (Tetuán, NE de Marruecos): *Geogaceta*, 38, 159-162.
- Nesbitt, H.W., Young, G.M., 1982, Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites: *Nature*, 299, 715-717.
- Okay, N., Ergüin, B., 2005, Source of the basinal sediments in the Marmara Sea investigated using heavy minerals in the modern beach sands: *Marine Geology*, 216, 1-15.
- Oldfiel, F., 1991, Environmental magnetism-a personal perspective: *Quaternary Science Review*, 10, 73-85.

- Oldfield, F., Maher, B., Donoghue, J., Pierce J., 1985, Particle-size related, mineral magnetic source sediment linkages in the Rhode River catchment, Maryland, USA: *Journal of the Geological Society*, 142, 1035-1046.
- Olivier, N., Boyet, M., 2006, Rare earth and trace elements of microbialites in Upper Jurassic coral -and ponge-microbialite reefs: *Chemical Geology*, 230, 105-123.
- O'Reilly, W., 1984, *Rock and Mineral Magnetism*: Chapman and Hall, 220 pp.
- Oszczypko, N., Salata, D., 2005, Provenance analyses of the late Cretaceous–Palaeocene deposits of the Magura Basin (Polish Western Carpathians) - evidence from a study of the heavy minerals: *Acta Geologica Polonica*, 55, 237–267.
- Pardo, M., 1993, Características sismotectónicas de la subducción de las placas de Rivera y Cocos en el sur de México. PhD Thesis. Instituto de Geofísica, UNAM, 129 pp.
- Pardo, M., Suárez, G., 1995, Shape of the subducted Rivera and Cocos plates in southern Mexico: seismic and tectonic implications: *Journal of Geophysical Research*, 100 (B7), 12357-12373.
- Peitido, V.E., Piñeiro, R.R., Martínez, C. A., 2002, Distribución de algunos elementos mayores (K, Ca, Ti, Fe) y traza (Ga, Rb, Sr, Y, Zr, Br) en dos suelos podsólicos: *Edafología*, 9(11), 61-84.
- Pérez-Cruz, L., Urrutia-Fucugauchi, J., 2009, Magnetic mineral study of Holocene marine sediments from the Alonso Basin, Gulf of California-implications for depositional environment and sediment sources: *Geofísica Internacional*, 48(3), 305-318.
- Pérez-Cruz, L., Urrutia-Fucugauchi, J., 2010, Holocene laminated sediments from the southern Gulf of California: geochemical, mineral, magnetic and microfossil study: *Journal of Quaternary Science*, 25, 989-1000. DOI: 10.1002/jqs.1386
- Perissoratis, C., Angelopoulos, I., Mitropoulos, D., 1987, Exploring the offshore area of N. E. Greece for placer deposits: geologic framework and preliminary results. In: Relesis, P.

- G., Dobron, M. R., Moore, J. R., Stackelberg, U. V. (Eds), Marine Minerals: Advances in Research and Resource Assessment. Proc. ARW, Aberystwyth (Wales), 588, 57-70.
- Pettijohn, F.J., 1975. Sedimentary Rocks: Haper and Row Publishers, 628 pp.
- Plingguo, Y., Renzhao, M., Hongbo, S., 2009, An investigation on magnetic susceptibility of hazardous saline.alkaline soils from the contaminated Hai River Basin, China: Journal of Hazardous Materials, 172, 494-497.
- Potter, P.E. 1986, South America and a few grains of sand: part 1-beach sands: Journal of Geology, 94, 301-319.
- Prothero, Donald R., Schwab, Fred., 1999, Sedimentary geology: An Intoduction to Sedimentary Rocks and Stratigraphy: Freeman and Company, 575 pp.
- Ramírez-Herrera, M.T., Urrutia-Fucugauchi, J., 1999, Morphotectonic zones along the coast of the Pacific continental margin, southern Mexico: Geomorphology, 28, 237-250.
- Ramírez-Herrera, M.T., Kostoglodov, V., Urrutia-Fucugauchi, J., 2011, Overview of Recent Coastal Tectonic Deformation in the Mexican Subduction Zone: Pure Applied Geophysics, 168, 8/9. DOI: 10.1007/s00024-010-0205-y
- Razjigaeva, N.G., Naumova, V.V., 1992, Trace element composition of detrial magnetite from coastal sediments of northwestern Japan Sea for provenance study: Journal of Sedimentary Research, 62 (5), 802-809.
- Rey, D., Mohamed, K. J., Bernabeu, A., Rubio, B., Vilas, F., 2005, Early diagenesis of magnetic minerals in marine transitional environments: geochemical signatures of hydrodynamic forcing: Marine Geology, 215, 215-236.
- Robinson, S.G., 1986, The late Pleistocene palaeoclimatic record if North Atlantic deep-sea sediments revealed by mineral-magnetic measurements: Physics of the Earth and Planetary Interiors, 42, 22-47.

- Rollinson, H.R., 1995, Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation: Longman Geochemistry Series Longman House, Burnt Mill, Harlow Essex CM20 2JE, England and Associated Companies throughout the world, 352 pp.
- Rosales-Hoz, L., Carranza-Edwards, A., 2001, Geochemistry of deep-sea sediment cores and their relationship with polymetallic nodules from the north-eastern Pacific: Marine and Freshwater Research, 52, 259-266.
- Rosales-Hoz, L., Carranza-Edwards, A., Ceron-Alvarado, J., Santiago-Pérez, S., 2006, Spatial variability of particle associated trace elements in the Panuco River discharge area, Gulf of Mexico: International Journal of Environment and Pollution, 26, 156-173.
- Roser, B.P., Korsch, R.J., 1986, Determination of tectonic setting of sandstone mudstone suites using SiO<sub>2</sub> content and K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O ratio: Journal of Geology, 94, 635-650.
- Shankar, R., Thompson, R., Prakash, T.N., 1996, Estimation of heavy and opaque mineral contents of beach and offshore placers using rock magnetic techniques: Geology Marine Letters, 16(4), 313-318.
- Schwartz, M.O., Rajah, S.S., Askury, A.K., Putthapiban, P., Djaswadu, S., 1995, The Southeast Asian Tin Belt: Earth Science Reviews, 38, 95-293.
- Sly, P.G., Thomas, R.L., Pelletier, B.R., 1983, Interpretation of moment measures derived from waterlain sediments: Sedimentology, 30, 219-233.
- SMN, 1981, Atlas de trayectorias ciclónicas 1960-1980 1a edición, México, Servicio Meteorológico Nacional, 326 pp.
- SSN, 2011. Estadísticas del SSN, Servicio Sismológico Nacional.  
<http://www.ssn.unam.mx/website/jsp/fuertes.jsp>
- Suárez, G., Sánchez, O., 1996, Shallow depth of seismogenic coupling in southern Mexico: implications for the maximum size of earthquakes in the subduction zone: Physics of the Earth and Planetary Interiors, 93, 53-61.

- Tamayo, J. L., 2002, *Geografía Moderna de México*: Trillas S. A., 512 pp.
- Tarling, D.H., Hrouda, F., 1993, *The magnetic anisotropy of rocks*: Chapman & Hall, 217 pp.
- Tauxe, L., 1993, Sedimentary records of relative paleointensities: theory and practice: *Reviews of Geophysics*, 31 (3), 319–354.
- Taylor, S.R., McLennan, S.M., 1985, *The Continental Crust; Its Composition and Evolution*: Blackwell, 312 pp.
- Thompson, R., Oldfield, F., 1986, *Environmental Magnetism*: Allen and Unwin, 227pp.
- Urrutia-Fucugauchi, J., 1981, Some observations on short-term magnetic viscosity behaviour at room temperature. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 26, 1-5.
- Urrutia-Fucugauchi, J., 1983, Paleomagnetism and rock magnetism of selected intrusive igneous bodies from southern Mexico: I Reconnaissance study of the Acapulco and Tierra Colorada intrusives. *Geofísica Internacional*, 22, 39-56.
- Urrutia-Fucugauchi, J., Bohnel, J., Negendank, J.F.W., 1991, Magnetic properties and domain state of titanomagnetites in a columnar basalt from Mexico: *Journal of Geomagnetism & Geoelectricity*, 43, 189-205.
- Urrutia-Fucugauchi, J., Ortega-Ramírez, J., Cruz-Gatica, R., 1997, Rock-magnetic study of Late Pleistocene-Holocene sediments from the Babícora lacustrine basin, Chihuahua, northern Mexico: *Geofísica Internacional*, 36, 77-86.
- Visher, G.S., 1969, Grain size distribution and depositional processes: *Journal of Sedimentology Petrology*, 39 (3), 1074-1106.
- Walden, J., 1999, Sample collection and preparation. In: Walden, J., Smith, J.P., Oldfield, F., (eds.), *Environmental Magnetism, A Practical Guide*: Quaternary Research Association. *Technical Guide*, 6, 26-34.

Watkins, S., J., Maher, B.A., 2003, Magnetic characterisation of present-day deep-sea sediments and sources in the North Atlantic, *Earth and Planetary Science Letters*, 214, 379-394. DOI: 10.1016/S0012-821X(03)00422-9.

Yu, L., Oldfield, F., 1993, Quantitative sediment source description using magnetic measurements in a reservoir-catchment system near Nijar, SE. Spain: *Earth Surface Processes and Landforms*, 18, 441-454.

Zhang, W., Yu, L., Hutchinson SM., 2001, Diagenesis of magnetic minerals in the intertidal sediments of the Yangtze Estuary, China, and its environmental significance, *Science of the Total Environment*, 266, 160-175.

[http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=con\\_content&view=article&aid=110&Itemid=105](http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=con_content&view=article&aid=110&Itemid=105)

<http://weather.noaa.gov/weather/current/MMIA.html>

[http://www.cartography-gis.com/pdf/44\\_Fernandez\\_Eguiarte\\_Mexico\\_paper.pdf](http://www.cartography-gis.com/pdf/44_Fernandez_Eguiarte_Mexico_paper.pdf)

[http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/DOF\\_19-01-2009a.pdf](http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/DOF_19-01-2009a.pdf)



**ANEXO 1. Parámetros analizados en los diferentes tipos de muestra de arenas.**

<b>Muestra total</b>	<b>Concentrado magnético</b>	<b>Concentrado no magnético</b>
<b>Tamaño de grano</b>		
<b>Clasificación</b>		
<b>Simetría</b>		
<b>Curtosis</b>		
<b>Petrología</b>		
cuarzo total		
feldespato total		
líticos totales		
minerales pesados		
<b>Índice de madurez</b>		
<b>Índice de procedencia</b>		
<b>Índice de alteración química</b>		
<b>índice de alteración de plagioclasas</b>		
<b>Geoquímica</b>	<b>* Geoquímica</b>	<b>Geoquímica</b>
Elementos traza	Elementos traza	Elementos traza
Elementos mayores	Elementos mayores	Elementos mayores
<b>Susceptibilidad magnética</b>	<b>Susceptibilidad magnética</b>	<b>Susceptibilidad magnética</b>
Alta frecuencia	Alta frecuencia	Alta frecuencia
Baja frecuencia	Baja frecuencia	Baja frecuencia
	<b>* Magnetización remanente natural</b>	<b>Magnetización remanente natural</b>

11 playas  
 3 muestras/playa  
 total 33 muestras  
 \* 30 muestras



## ANEXO 2. Fotografías de muestras de arenas de playa.



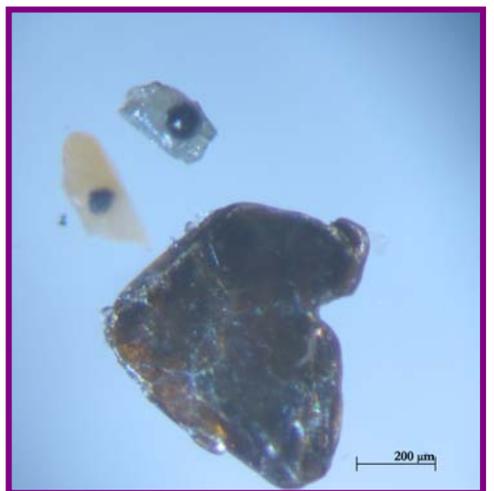
AS: Fragmento de roca sedimentaria, redondeado (arenisca de grano fino).



AS: Cuarzo translucido, subredondeado.



BI: Clastos alargados, angulosos, alterados de biotita.



BM: Mica intemperizada (biotita).



CM: Fragmento calcareo redondeado.



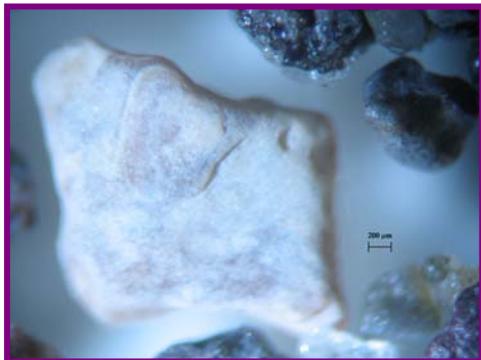
BM: Clastos translucidos, subangulosos, amorfos, abundan los cuarzoes.



CS: Cuarzo opaco, redondeado -- con incrustaciones de minerales oscuros magnéticos.



DM: fragmento de minerales oscuros magnéticos (magnetita).



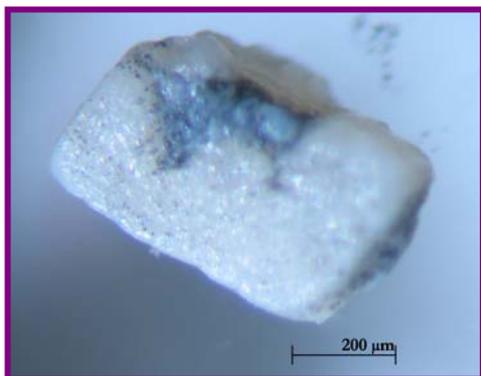
EI: Fragmento carbonatado.



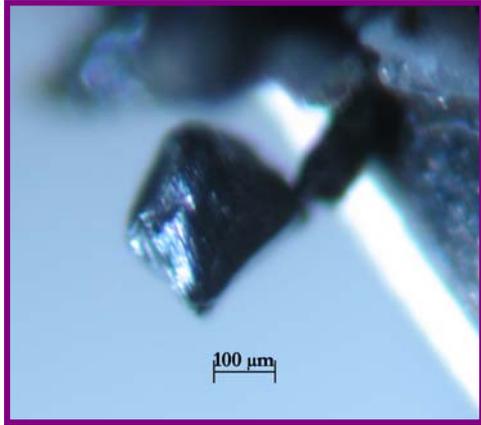
JS: Fragmento lechoso, angular, (feldespato) con inclusiones de oxido de fierro.



HI: Clastos de minerales magnéticos.



HI: Clasto lechoso, angular (plagioclasa).



IS: Mineral opaco, oscuro, magnético (magnetita).



Jl: Fragmento opaco, oscuro, sub-redondeado, de densidad elevada, con inclusión de olivino.



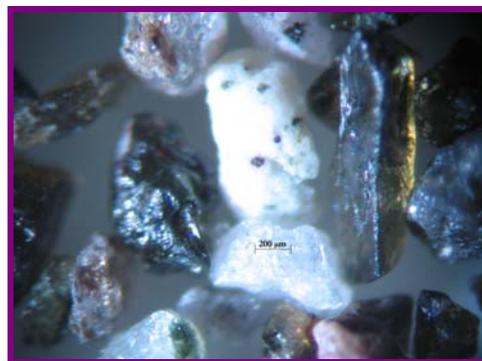
FI: Fragmentos de rocas sedimentarias Redondeadas (arenisca de grano fino).



KM: Fragmento opaco, anguloso, con óxido de hierro (roca ígnea).



KM: Feldespato.



Jl: Calcita con incrustación metálica.