

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA**



**VARIACIONES EN LA COMPOSICIÓN DE LAS ARENISCAS  
BASALES DE LA CUENCA DE LA POPA Y MARGEN  
ORIENTAL DE LA CUENCA DE PARRAS,  
NORESTE DE MÉXICO**

**TESIS**

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR AL GRADO DE

**MAESTRO EN CIENCIAS GEOLÓGICAS**

PRESENTA

**MARÍA DE JESÚS MARTÍNEZ LÓPEZ**

LINARES, NUEVO LEÓN

MARZO DE 2012



**UANL**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN®



FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA®

LA TESIS

**VARIACIONES EN LA COMPOSICIÓN DE LAS ARENISCAS BASALES DE LA CUENCA DE LA POPA Y MARGEN ORIENTAL DE LA CUENCA DE PARRAS, NORESTE DE MÉXICO**

ELABORADA POR

**MARÍA DE JESÚS MARTÍNEZ LÓPEZ**

HA SIDO ACEPTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR  
AL GRADO ACADÉMICO DE

**MAESTRO EN CIENCIAS GEOLÓGICAS**

VO. BO.  
**DIRECTOR DE TITULACIÓN**

**DR. UWE JENCHEN**

LINARES, NUEVO LEÓN

MARZO DE 2012



**UANL**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA

LA TESIS

**VARIACIONES EN LA COMPOSICIÓN DE LAS ARENISCAS BASALES DE LA CUENCA DE LA POPA Y MARGEN ORIENTAL DE LA CUENCA DE PARRAS, NORESTE DE MÉXICO**

ELABORADA POR

**MARÍA DE JESÚS MARTÍNEZ LÓPEZ**

HA SIDO ACEPTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR  
AL GRADO ACADÉMICO DE

**MAESTRO EN CIENCIAS GEOLÓGICAS**

VO. BO.

**COMITÉ DE REVISIÓN DE TITULACIÓN**

**DR. UWE JENCHEN**

**DR. JOSÉ GUADALUPE LÓPEZ OLIVA**

**DR. DIRK MASUCH OESTERREICH**

LINARES, NUEVO LEÓN

MARZO DE 2012

*Por este medio declaro bajo protesta, haber realizado esta tesis de manera personal y haber utilizado únicamente los medios, procedimientos y asesorías descritas en la misma.*

*María de Jesús Martínez López*

*Marzo de 2012*

## **Dedicatoria**

A mi madre

***Yolanda López Almaguer***

Por todo lo que has hecho por mí, porque a ti te debo todo lo que soy y porque si yo he llegado hasta aquí, es por ti. Eres una gran madre y mi ejemplo a seguir. ¡Muchas gracias por todo mamá!

A mi padrastro

***José Antonio Trujillo Castillo***

Por haberme apoyado siempre y haber creído en mí todos estos años. ¡Muchas gracias!

## **Agradecimientos**

A la Universidad Autónoma de Nuevo León, por la formación técnica y humana recibida durante todos estos años desde la preparatoria hasta el posgrado.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo brindado sin el cual no hubiera sido posible el haber llegado a esta etapa.

A mi asesor, Dr Uwe Jenchen, gracias por haberme guiado durante todos estos años y tenerme una gran paciencia, así como por todo el apoyo moral que me ha brindado. Muchísimas gracias no sólo por la formación técnica sino también por la formación humana que he recibido de parte suya. Muchísimas gracias por haber creído en mí. Llevaré conmigo siempre todas sus enseñanzas y consejos ¡Muchísimas gracias!

Al Dr. Dirk Masuch, cuyas ideas y apoyo han sido fundamentales para la elaboración de esta tesis, gracias por la paciencia que ha tenido para conmigo durante este tiempo así como por todos sus consejos y alentarme a cumplir mis sueños. Llevaré conmigo siempre todos sus consejos. ¡Muchas gracias!

Al Dr. José Guadalupe López Oliva por formar parte del comité de revisión, por el apoyo y los consejos que me ha brindado siempre. ¡Muchas gracias!

Al Ing. Manuel Maldonado por todos sus consejos y la formación humana que recibí de parte suya durante este tiempo. Llevaré conmigo siempre todos sus consejos. ¡Muchísimas gracias!

Así mismo, a todos aquellos docentes que han contribuido a mi formación durante la maestría: Dr. Gabriel Chávez Cabello, Dra. Elizabeth Chacón, Mtra. Manuelita González, Dr. Fernando Velasco, Dr. Juan Carlos Montalvo, Ing. Federico Viera, etc. ¡Gracias a todos!

A la Sra. Melita Perales, por haberme brindado el calor de hogar que tanto me hacía falta aquí en Linares así como por todos sus consejos y enseñanzas, gracias por ser como una segunda madre para mí. ¡Muchísimas gracias por todo!

A la Ing. Laura Alejandra Santana Salas, por haberme brindado su amistad durante todo este tiempo y por ser como una hermana para mí. ¡Muchísimas gracias Ale!

A la Ing. Andrea Escobar Morales, por su amistad, por su hospitalidad y por ser una gran amiga. ¡Muchas gracias!

Al Ing. Israel Leal por haberme apoyado durante el trabajo de campo ¡Muchas gracias!

A mis amigos y compañeros: Adán, Mario, Charly, Lupita show, Isabel, Rosy, Lupita, Ana así como las chicas y chicos de su generación que si bien no los conozco a todos, me hicieron aprender muchas cosas que me han ayudado a crecer como persona. ¡Muchas gracias a todos!

También quiero agradecer a toda la gente maravillosa de Mina y García, Nuevo León por el apoyo brindado para la presente investigación. ¡Muchas gracias!

Y a todas aquellas personas que he omitido de manera involuntaria, pero que me han apoyado siempre y han hecho de esta etapa de mi vida, un tiempo mucho más agradable, muchísimas gracias.

¡Muchas gracias a todos! ¡Nunca los olvidaré!

Un hombre que no arriesga nada por sus ideas, o no valen nada sus ideas, o no vale nada el hombre.

Platón



Τα πάντα ρει πάντα χωρεί και ουδέν μένει  
Ηράκλειτος

Cada grano de arena es  
como un amigo que nos  
invita a descubrir su historia

Marychuy

La Geología es el poema de la Tierra cantado con pobres palabras humanas

R. Gheyselinck

---

**Índice**

Índice .....	i
Figuras .....	iii
Tablas .....	vi
Resumen .....	vii
Abstract .....	viii
1 Generalidades .....	1
1.1 Introducción .....	1
1.2 Antecedentes .....	3
1.3 Objetivos y metodología .....	3
1.3.1 Hipótesis .....	3
1.3.2 Objetivos .....	3
1.3.3 Metodología .....	4
2 Geología Regional .....	5
2.1 Introducción .....	5
2.1 Evolución tectónica del Noreste de México .....	6
2.1.1 Paleozoico .....	6
2.1.2 Mesozoico .....	6
2.1.2.1 Triásico Tardío–Jurásico Medio .....	6
2.1.2.2 Jurásico Tardío .....	7
2.1.2.3 Cretácico Temprano .....	8
2.1.2.4 Cretácico Tardío .....	9
2.1.2.5 Cenozoico .....	10
2.2 Paleogeografía del Noreste de México .....	10
2.2 Cuencas de Parras y La Popa .....	23
2.3 El Grupo Difunta .....	25
2.4 La Formación Muerto .....	30
3 Geología Local .....	34
3.1 Áreas de Estudio .....	34
3.1.1 Sección Microondas (MM) .....	35
3.1.2 Sección Boca de Potrerillos (BP) .....	36
3.1.3 Sección Las Presas (LP) .....	37
3.1.4 Sección El Gordo (EG) .....	38
3.1.5 Sección El Delgado (ED) .....	39
3.1.6 Sección Los Fierro (LF) .....	40
3.2 Cambios regionales de la Fm. Muerto .....	41
3.3 Espesores de la Fm. Muerto .....	43
4 Petrografía .....	45
4.1 Introducción .....	45
4.2 Las areniscas en los análisis de procedencia .....	45

---

4.3	Principales constituyentes de las areniscas .....	47
4.3.1	Cuarzo .....	48
4.3.2	Feldespatos .....	49
4.3.3	Fragmentos líticos .....	50
4.3.4	Accesorios .....	51
4.4	Petrofacies .....	57
4.4.1	Sección Microondas .....	57
4.4.2	Sección Boca de Potrerillos.....	58
4.4.3	Sección Las Presas .....	60
4.4.4	Sección El Gordo .....	61
4.4.5	Sección El Delgado .....	62
4.4.6	Sección Los Fierro .....	64
4.5	Resultados .....	65
4.5.1	Tipo de roca.....	65
4.5.2	Ambiente tectónico .....	66
4.6	Conclusiones de la Petrografía .....	71
5	Geoquímica .....	72
5.1	Introducción .....	72
5.2	Elementos mayores y elementos trazas .....	72
5.3	Diagramas de elementos mayores .....	74
5.3.1	Tipo de roca.....	76
5.4	Diagramas de elementos traza.....	78
5.5	Área fuente .....	82
5.6	Tierras raras.....	83
5.7	Cambios estadísticos en la composición .....	88
5.7.1	Elementos mayores .....	88
5.7.2	Elementos traza .....	91
5.8	Conclusiones de la Geoquímica .....	93
6	Conclusiones y recomendaciones.....	94
7	Bibliografía.....	96

## Figuras

Fig. 1-1: Localización del área de estudio en el Estado de Nuevo León, en la región noreste de México (Tomado de Google Earth). .....	2
Fig. 2-1: Modelo de evolución tectónica para las provincias del este y oeste de México, las secciones se encuentran orientadas en una dirección Oeste–Este a través del noreste de México (Tomado de Goldhammer, 1999; sin escala). .....	11
Fig. 2-2: Paleogeografía para el Calloviano – Oxfordiano Inferior. (1) Fm. La Gloria, (2) Facies de <i>sabkha</i> de las Formaciones Minas Viejas y Olvido (Tomado de Eguiluz de Antuñano, 2001). .....	12
Fig. 2-3: Oxfordiano Superior-Kimmeridgiano Inferior. (1) Fm. La Gloria, (2) Fm. Olvido (Tomado de Eguiluz de Antuñano, 2001). .....	13
Fig. 2-4: Kimmeridgiano Medio: (1) Facies arenosas, (2) Fm. La Casita (tomado de Eguiluz de Antuñano, 2001). .....	14
Fig. 2-5: Reconstrucción paleogeográfica para el Titoniano (1) Arenas de anteplaya, (2) Fm. La Casita (tomado de Eguiluz de Antuñano, 2001). .....	15
Fig. 2-6: Paleogeografía para el Berriasiano, (1) Fm. Menchaca, (2) Fm. Taraises, (3a) Facies aluviales de la Fm. San Marcos, (3b) Facies deltáicas de la Fm. San Marcos, (4) Fm. Hosston (Tomado de Eguiluz de Antuñano, 2001). .....	16
Fig. 2-7: Paleogeografía para el Hauteriviano Inferior. (1) Fm. San Marcos, (2) Fm. Hosston, (3a) Arenas de anteplaya y (3b) Caliza arcillosa de la Fm. Barril Viejo, (4) Fm. Taraises (Tomado de Eguiluz de Antuñano, 2001). .....	17
Fig. 2-8: (a) Paleogeografía para el Hauteriviano Inferior, donde (1) Fm. San Marcos, (2) Facies de planicie aluvial de la Fm. Hosston, (3a) Facies de arenas de anteplaya y (3b) Caliza arcillosa de la Fm. Barril Viejo, (4) Fm. Taraises. (b) Modelo paleogeográfico para el Hauteriviano Superior – Barremiano Inferior, donde (1) Fm. San Marcos, (2) Fm. Hosston, (3) Fm. La Mula, (4) Fm. Padilla, (5) Fm. Cupido, (6) Fm. Tamaulipas Inferior (tomado de Eguiluz de Antuñano, 2001). .....	19
Fig. 2-9: Paleogeografía para el Albiano. (1) Facies de carbonatos de cuencas de las Formaciones Tamaulipas Superior- Georgetown, (2a) fFacies arrecifales Stuart City, (2b) Arrecife Viesca, (3) Fm. Acatita, (4) Fm. Macknight, (5) Fm. Monclava (Tomado de Eguiluz de Antuñano, 2001). .....	20
Fig. 2-10: Paleogeografía para el Campaniano-Maastrichtiano (1) Facies continentales de planicie Aluvial (2a) Complejo de facies deltáicas Nueva Rosita (2b) Complejo de facies deltáicas La Popa-Grupo Difunta (Taylor, Navarro, Midway, Wilcox y Gpo. Difunta) (3) Facies lutíticas pro-delta (Formaciones Parras-Méndez -Wilcox). (Tomado de Eguiluz de Antuñano, 2001). .....	22
Fig. 2-11: Paleogeografía para el Maastrichtiano, período en el cual, diversos sistemas fluviales transportaron y depositaron sedimentos en la región noreste de México (tomado de Goldhammer, 1999). LP= Cuenca de La Popa, GD = Grupo Difunta, CP = Cuenca de Parras, AM = Antepaís del Maastrichtiano, AMA = Arco Magmático Alisitos, AS = Alto Sabine. ....	24

Fig. 2-12: Localización geográfica del Grupo Difunta entre los Estados de Coahuila y Nuevo León en la región noreste de México (Imagen obtenida con el programa Google Earth, 2010; modificada).....	25
Fig. 2-13: Columna estratigráfica para las cuencas Parras y La Popa (Tomado de Lawton et al., 2009).....	29
Fig. 2-14: Modelo Depositional del inicio de la depositación del Grupo Difunta así como la formación de lentiles carbonatados asociados a los diapiros mientras estos continúan creciendo. (Maastrichtiano). (Tomado de Martínez López, 2009). ....	30
Fig. 2-15: Diagrama de bloque para el ambiente deposicional de la Fm. Muerto basado en Weislogel & Lawton (2000), McBride et al. (1974), Radack (1986) y Halik (1988); (Tomado de Weislogel & Lawton, 2000).....	32
Fig. 2-16: Distribución de la Fm. Muerto en la Cuenca de La Popa y zonas adyacentes cercanas a la Curvatura de Monterrey (Modificado de Google Earth).....	33
Fig. 3-1: Ubicación de las localidades estudiadas (Tomada de Google Earth, 2011).....	34
Fig. 3-2: Ubicación y perfil estratigráfico de la localidad Microondas al norte de la Cuenca de La Popa.....	35
Fig. 3-3: Localización y perfil estratigráfico de Boca de Potrerillos al este de la Cuenca de La Popa. En la imagen de la derecha, de arriba hacia abajo: Bioturbación ( <i>Ophiomorpha</i> ), laminación cruzada y rizaduras en la Fm. Muerto. ....	36
Fig. 3-4: Localización y columna estratigráfica del afloramiento Las Presas en la parte oeste de la cuenca.....	37
Fig. 3-5: Ubicación y perfil estratigráfico de El Gordo en el centro de la Cuenca de La Popa. En la imagen derecha, de arriba hacia abajo: Contacto entre la Fm. Muerto y la Fm. Potrerillos, rizaduras en la parte inferior de la Fm. Muerto.....	38
Fig. 3-6: Localización geográfica y perfil estratigráfico de El Delgado. En la imagen derecha, de arriba hacia abajo: Bioturbación ( <i>Ophiomorpha</i> ), bioturbación, banco de ostras ( <i>Exogyra costata</i> ) y rizaduras. ....	39
Fig. 3-7: Localización geográfica de Los Fierro y perfil estratigráfico. En la imagen derecha, de arriba hacia abajo: Laminación cruzada en banco de gasterópodos, banco de gasterópodos y parte inferior de la Fm. Muerto en la localidad.....	40
Fig. 3-8: Cambios regionales de la Fm. Muerto en la Cuenca de La Popa y cerca de la Curvatura de Monterrey (Fotografía satelital: Google Earth, 2011).....	42
Fig. 3-9: Localidades en donde se midió el espesor de la Fm. Muerto (Base del mapa: imagen satelital de Google Earth, 2011.).....	43
Fig. 4-1: Tipos de crecimientos de cuarzos, utilizados para diferenciar los orígenes de este mineral (Folk, 1974).....	48
Fig. 4-2: Muestra de las petrofacies de la localidad Microondas bajo microscopio. ....	58
Fig. 4-3: Muestra de las petrofacies de Boca de Potrerillos bajo microscopio. ....	59
Fig. 4-4: Muestra de las petrofacies de Las Presas bajo microscopio.....	60
Fig. 4-5: Muestra de las petrofacies de El Gordo bajo microscopio.....	62
Fig. 4-6: Muestra de las petrofacies de El Delgado bajo microscopio.....	63
Fig. 4-7: Muestra de las petrofacies de Los Fierro bajo el microscopio.....	65
Fig. 4-8: Diagrama ternario de Folk para determinar el tipo de roca (Folk, 1980).....	66
Fig. 4-9: Diagrama ternario QFL para determinar el marco tectónico mediante la proporción relativa del cuarzo, del feldespato, y los fragmentos de roca (Dickinson & Suczek, 1979	

---

modificado por Fitcher & Poche, 1993). (a) Bloques continentales expuestos en un margen pasivo de tipo atlántico, (b) Orógeno reciclado, colisión continental, (c) Bloques continentales expuestos en proceso de ruptura, (d) Arcos magmáticos.....	67
Fig. 4-10: Diagrama ternarios QFL de Dickinson para discriminar ambientes tectónicos (Dickinson & Suczek, 1979). .....	68
Fig. 4-11: Diagramas ternarios QFL de Dickinson para discriminar ambientes tectónicos (Dickinson, 1983). .....	68
Fig. 4-12: Diagrama ternario QpLvLs para discriminar áreas fuente (Dickinson & Suczek, 1979). .....	70
Fig. 4-13: Diagrama para determinar la relación entre los tipos de fragmentos líticos (Dickinson et al., 1983). .....	71
Fig. 5-1: Diagrama binario $\log(\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O})$ vs $\log(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ para determinar tipos de roca (según Herron, 1988). .....	77
Fig. 5-2: Diagrama binario $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ vs $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ según Roser y Korsch (1986) .....	78
Fig. 5-3: Diagrama ternario Th vs Co vs Zr/10 para determinar ambientes tectónicos según Bathia & Crook (1986); A: Arco de islas oceánico, B: Arco de isla continental, C: Margen continental activo, D: Margen pasivo. ....	81
Fig. 5-4: Diagrama binario Th/Sc vs Zr/Sc según McLennan et al. (1993). .....	82
Fig. 5-5: Ti/Nb según Jenchen & Rosenfield, 2002 para determinar tipos de áreas fuente. ....	83
Fig. 5-6: Diagrama de multielementos normalizados a condritas según Taylor & McLennan, 1985. ....	87
Fig. 5-7: Diagrama de desviación estándar para el radio $\text{SiO}_2/\text{K}_2\text{O}$ . ....	89
Fig. 5-8: Diagrama de desviación estándar para el radio $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ . ....	89
Fig. 5-9: Diagrama de desviación estándar para el radio $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ . ....	90
Fig. 5-10: Diagrama de desviación estándar para el radio Zr/Sc. ....	91
Fig. 5-11: Diagrama de desviación estándar para el radio Th/Sc. ....	92
Fig. 5-12: Diagrama de desviación estándar para el radio Ti/Nb. ....	93

---

---

## Tablas

Tabla 4-1: Parámetros para los diagramas QFL.....	51
Tabla 4-2: Parámetros Qm y Qp .....	53
Tabla 4-3: Lithoclastos contados.....	54
Tabla 4-4: Parámetros Cemento, Matriz , Accesorios y Fósiles .....	55
Tabla 5-1: Clasificación de los ambientes tectónicos, cuencas sedimentarias así como tipos de procedencia relacionados a la concentración de elementos mayores (Bathia, 1983).....	73
Tabla 5-2: Concentración de elementos mayores .....	74
Tabla 5-3: Concentraciones de Tierras Raras .....	83



## Resumen

La Fm. Muerto del Grupo Difunta, el primer flujo de detritos de grano basto que relleno la Cuenca de La Popa durante el Maastrichtiano, presenta un comportamiento geoquímico peculiar al atravesar estructuras salinas. Su origen está vinculado con el aporte de detritos procedentes del occidente de composición volcánica principalmente. Se realizaron estudios petrográficos y geoquímicos para poder determinar su procedencia y su comportamiento a lo largo y ancho de la Cuenca de La Popa además de dos localidades fuera de la misma pertenecientes a la vecina Cuenca de Parras. Los estudios petrográficos no mostraron más de un área fuente y el comportamiento de la Fm. Muerto es bastante similar en las diversas localidades estudiadas. Respecto al comportamiento geoquímico de dicha formación, las principales variaciones se dieron en el contenido de tierras raras aunque si bien, son mínimas; mientras que, los elementos mayores no mostraron variaciones significativas. En este sentido, el reciclamiento constituye el principal factor diferenciable y característico en la parte norte de la cuenca, mientras que en la parte sur del área de estudio lo es la diagénesis. Los comportamientos geoquímicos de la Fm. Muerto en las localidades influenciadas por las estructuras salinas muestran una composición más uniforme y la disolución de feldespatos se vuelve evidente.

## Abstract

The Muerto Formation represents the first occurrence of coarse grain detritus within the Difunta Group in the La Popa basin. Crossing the salt domes outcropping in the La Popa range, the Muerto Formation shows somewhat peculiar geochemical characteristics. The Muerto Formation's source is believed to be from detrital material of predominantly volcanic origin west of its present outcrops.

Petrographical and geochemical studies were carried out to determine the origin and the geochemical history across the La Popa basin as well as in other two localities within the Parras basin.

Results suggest a single source only for the Muerto Formation while its geochemical behavior appears to be very similar at all sites sampled. Differences, while negligible, were detected in the contents of rare earth elements with major elements not showing significant variations.

Recycling is the major factor in the northern parts of the La Popa basin, while diagenesis is the significant factor in the southern parts. Geochemical characteristics of the Muerto Formation are mostly uniform within samples collected along the salt structures while the dissolution of feldspar becomes evident.

# 1 Generalidades

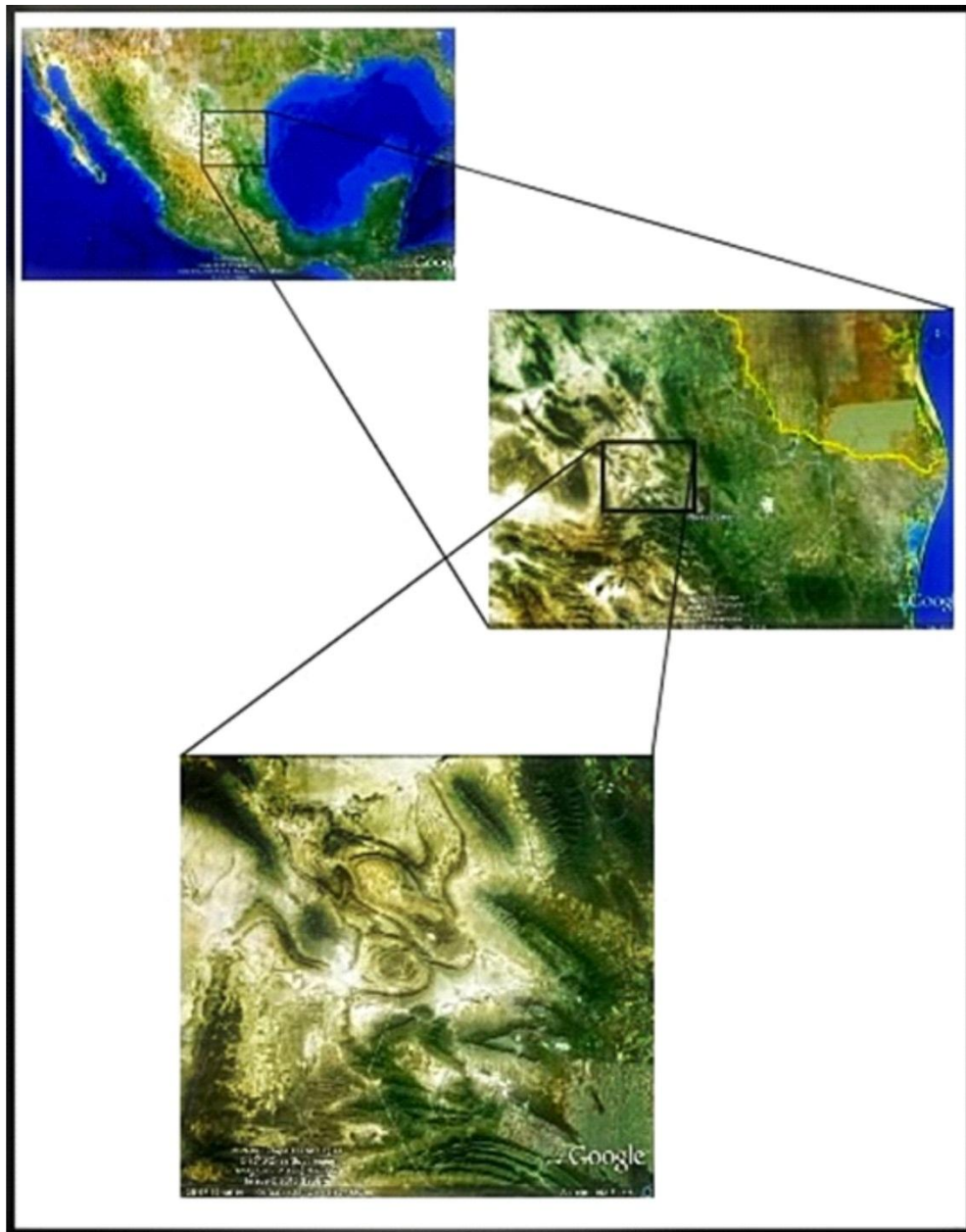
## 1.1 Introducción

La Formación Muerto del Grupo Difunta representa el primer influjo mayor de detritos de grano basto en la Cuenca de La Popa (Lawton et al., 2001) por lo que en la presente investigación se tratarán de determinar las variaciones en la composición de dichas areniscas tanto en la Cuenca de La Popa como en algunas localidades cercanas al sur de la misma. El conocer mejor a dicha formación tanto geoquímicamente así como desde el punto de vista de la petrografía sedimentaria, puede llevarnos a un mejor entendimiento del comienzo de la sedimentación en la cuenca así como a conocer más a fondo la paleogeografía de la región al inicio de la depositación en dicha cuenca.

Dicha formación tiene su localidad tipo sobre el flanco sur del Sinclinal Delgado donde su espesor es medido en 570 m. Su litología está compuesta de areniscas interdigitadas con limolitas y lutitas, además contiene abundantes fragmentos de granos líticos volcánicos y plagioclasas, lo cual sugiere una fuente de tipo volcánico (Tardy & Murray, 1973; McBride et al., 1975; Lawton et al., 2001). En cambio, su edad está considerada como maastrichtiana debido a la presencia de *Exogyra costata* y de *Sphenodiscus pleurisepta* considerados como fósiles guía para dicho período en esta región (Lawton et al., 2001).

Por otra parte, la Cuenca de La Popa fue generada durante la fragmentación del supercontinente Pangea y fue alimentada posteriormente por sistemas fluviales procedentes del occidente durante el Maastrichtiano hasta el Eoceno Medio generando las cinco Formaciones constituyentes del Grupo Difunta, el cual está compuesto por sedimentos clásticos, principalmente areniscas, lutitas y limolitas (Lawton et al., 2001; Weidie et al., 1972).

El área de estudio se localiza en la Cuenca de La Popa perteneciente al municipio de Mina, al noroeste de la Ciudad de Monterrey, así como en el municipio de García en el Estado de Nuevo León en la región noreste de México (Fig. 1-1).



**Fig. 1-1: Localización del área de estudio en el Estado de Nuevo León, en la región noreste de México (Tomado de Google Earth).**

## **1.2 Antecedentes**

Respecto a los estudios previos realizados para la Formación Muerto en particular, pueden mencionarse aquellos efectuados por Weislogel & Lawton (2000), así como Lawton et al. (2009); el primero de ellos sobre la comparación de la relación Fm. Muerto/diapiro El Gordo respecto a las relaciones Fm. Frío/diapiro Nash y Fm. Frío/diapiro Splindetop, estos últimos con producción de hidrocarburos localizados en el Golfo de México; mientras que el segundo versa sobre la procedencia de las areniscas del Grupo Difunta en donde la Fm. Muerto es correlacionada con el Miembro Inferior de Limolitas de la Fm. Cañón del Tule, en la Cuenca de Parras.

## **1.3 Objetivos y metodología**

### **1.3.1 Hipótesis**

En base a los cambios regionales, petrográficos y de influencia salina ¿habrá, además, una variación en la composición de las areniscas de la Fm. Muerto? Y si es así, ¿será significativa o minúscula? ¿Será consecuencia de un cambio de área fuente? Y si es así, ¿cuál/es es/ son dicha/s área/s fuente/s?

### **1.3.2 Objetivos**

- Determinar las variaciones en la composición de la Fm. Muerto del Grupo Difunta en localidades estratégicas de la Cuenca de La Popa así como en dos localidades al sur de la misma.
- Además se documentarán los cambios litológicos y geoquímicos en el espacio.

### **1.3.3 Metodología**

- Realizar un perfil estratigráfico en cada localidad
- Determinar la composición de las muestras en base a análisis petrográficos y geoquímicos
- Hacer una correlación de las localidades estudiadas y determinar los cambios regionales de la Fm. Muerto

## 2 Geología Regional

### 2.1 Introducción

La región noreste de México, tectónicamente representa la conjunción de dos provincias tectonoestratigráficas altamente contrastantes: La Provincia del Golfo de México que representa una evolución tectónica influenciada por el desarrollo de un margen pasivo asociado a la apertura del golfo entre el Jurásico Medio–Cretácico Tardío, donde la estratigrafía está dominada principalmente por rocas sedimentarias marinas de la Era Mesozoica; y la Provincia del Pacífico, la cual está influenciada por la subducción mesozoica en el margen occidental (Goldhammer, 1999).

Durante la ruptura del supercontinente Pangea en el Triásico y parte del Jurásico, producto del fallamiento normal profundo en la corteza, se originan cuencas y altos estructurales, los cuales controlaron la historia paleogeográfica de la región durante el Mesozoico Tardío (Goldhammer, 1999).

Fue el continuo levantamiento de las tierras occidentales durante la Tectogenia Laramide durante el Cretácico Tardío al Eoceno Temprano, lo que provocó la deformación de la totalidad de la secuencia depositada durante el desarrollo del *rift* y el margen pasivo (Goldhammer, 1999); además lo anterior propició el desarrollo de sistemas fluviales, los cuales acarrearón grandes volúmenes de sedimentos que fueron depositados en sistemas deltaicos a lo largo de la costa del Golfo de México en aquella época. Lo anterior se prolongó desde el Campaniano hasta el Terciario Temprano y propició el relleno de dos cuencas sedimentarias: Parras y La Popa, las cuales representan a una de las secuencias litológicas más importantes del noreste mexicano: el Grupo Difunta (Vega-Vera et al., 1989). En los siguientes apartados se repasará la historia tectónica mesozoica regional, para posteriormente continuar con la geología local.

## 2.1 Evolución tectónica del Noreste de México

### 2.1.1 Paleozoico

Desde el Carbonífero hasta el Pérmico, en la parte sur de Laurasia y norte de Gondwana, se llevó a cabo el encuentro de estas dos masas continentales así como la subsecuente formación del supercontinente Pangea. Dicha colisión, dio origen a una gran sutura conocida como el Cinturón Ouachita-Marathon. (Pindell & Dewey, 1982), el cual se encuentra conformado por rocas metasedimentarias del Pérmico y Carbonífero además de secuencias de tipo *flysch* del Pérmico Temprano (Goldhammer, 1999), y contiene además depósitos volcanoclásticos con afinidad de arco en el borde sureste de América del Norte (Coney, 1983). Más adelante, el basamento generado durante dicha colisión, se convertiría en el Bloque de Yucatán, el cual se ubicaría al sur del Cinturón Ouachita-Marathon ocupando la porción que actualmente constituye el Golfo de México. (Goldhammer, 1999).

### 2.1.2 Mesozoico

#### 2.1.2.1 Triásico Tardío–Jurásico Medio

Es durante esta época, donde tiene lugar el inicio del *rift* continental, el cual originó los procesos de fragmentación del continente (Fig. 2-1). Lo anterior comenzó en la parte norte del Bloque de Yucatán y al sur del límite actual de la placa norteamericana (Salvador, 1991). Dicha fase está caracterizada por una deformación extensional donde son generados *grabens* y *horsts*, debido a la extensión por medio de fallamiento normal. Asimismo, se generaron altos estructurales tales como las islas de Coahuila, la Mula, de Monclova, así como el Bloque Burro-Peyotes y el Archipiélago de Tamaulipas; dichas estructuras controlaron la sedimentación de la zona hasta finales de la Era Mesozoica (Goldhammer, 1999).

Aunado a lo anterior, fueron creadas depresiones tales como las cuencas de Sabinas, Maverick, Mexicana (también nombrada Geosinclinal Mexicano), Magiscatzin, así como los canales de Chihuahua y Monterrey, que se encontraban limitados por fallamiento normal, mientras que el precedente proceso de *rifting* culminó para el Oxfordiano Temprano (Goldhammer, 1999).



Por otro lado, el Bloque de Yucatán al separarse, permitió la entrada de aguas marinas someras al interior del continente, lo cual trajo consigo la generación de sedimentos evaporíticos tales como los correspondientes a las Formaciones Minas Viejas y Olvido, siendo dichos sedimentos, típicos para un estado inicial de desarrollo de cuenca de *rift*; asimismo este tipo de régimen tectónico dio origen a los depósitos continentales del Grupo Huizachal (Peterson, 2001).

Igualmente, ocurrieron movimientos de tipo intraplaca, que acaecieron en forma de fallas transformantes de tipo sinistral a lo largo de la Megacizalla Mojave–Sonora; además se especula, que dichos impulsos fueron ocasionados por la subducción oblicua de la placa Kula–Farallón sobre las placas Sudamericana y Yaqui (Pindell, 1985).

### **2.1.2.2 Jurásico Tardío**

Los depósitos correspondientes a las capas rojas del Grupo Huizachal así como las evaporitas de las Formaciones Olvido y Minas Viejas, finalizaron debido al ingreso y libre circulación del agua marina sobre el noreste mexicano. Lo anterior estuvo controlado por la deriva del Bloque de Yucatán, el cual se ve asociado al desarrollo de piso oceánico en el Golfo de México lo cual aconteció durante el Calloviano-Oxfordiano (Salvador, 1991).

Para esta época, el evento más trascendental lo constituye el desplazamiento del Bloque de Yucatán mediante la falla Tamaulipas-Chiapas (Pindell, 1985) durante la expansión del Golfo de México (Fig. 2.1), produciendo la separación entre América del Norte y América del Sur (Goldhammer, 1999). Posteriormente, dicha falla quedaría inactiva durante el Barremiano (Pindell, 1985), tiempo en el cual el punto de desprendimiento de Norteamérica y Sudamérica fue concentrado en el Protocaribe, donde la dispersión de piso oceánico continuó; mientras que, los carbonatos del Jurásico Superior cubrieron el Archipiélago de Tamaulipas quedando así establecido el margen continental para el noreste mexicano. Es aquí donde aconteció una transgresión marina que continuó hasta el Cretácico Tardío y que cubrió gran parte de México.

Por otro lado, la expansión del Golfo de México tuvo su final durante el Berriasiano (Padilla y Sánchez, 1985; Goldhammer, 1999), debido a que la dorsal existente en aquella época en el golfo, dejó de tener actividad. Posteriormente, comienza a desarrollarse una nueva dorsal al sur del Bloque de Yucatán ya en el Protocaribe, donde la dispersión continuó durante el Cretácico Temprano (Sedlock et al., 1993).

Finalmente, acontecieron períodos de subsidencia diferencial entre los bloques del basamento bajo un régimen termal, el cual quedó registrado por las facies carbonatadas que fueron depositadas sobre el Archipiélago de Tamaulipas y Burro-Peyotes. Para este tiempo, la Isla de Coahuila, permaneció emergida (Pindell, 1985; Wilson, 1990).

### **2.1.2.3 Cretácico Temprano**

Durante el Barremiano, comenzó una etapa de estabilidad tectónica, disminución de la subsidencia, así como de enfriamiento cortical debido al término de la expansión del Golfo de México (Goldhammer, 1999). Así mismo, el Bloque de Coahuila continuaba como alto estructural y además controló la distribución aunada a los patrones de progradación de facies carbonatadas y siliciclásticas en la cuenca de depositación (Goldhammer, 1999).

Por último, a lo largo de casi todo el Golfo de México fueron depositadas extensas plataformas carbonatadas, las cuales estuvieron influenciadas por sedimentos terrígenos en menor medida derivados de la Isla de Coahuila así como del Bloque de Yucatán, que aún permanecían emergidos (Goldhammer, 1999).

Cabe mencionar que uno de los eventos importantes ocurridos durante esta época, está representado por el salto de la dorsal entre Norteamérica y Sudamérica a partir del Golfo de México, hasta una posición al este de Yucatán. Además, a fines del Cretácico Temprano se llevó a cabo la disgregación de América del Sur y África en la porción sur del Atlántico (Coney, 1983).

#### 2.1.2.4 Cretácico Tardío

Durante esta época, prosigue la subsidencia de la cuenca, y por consiguiente, se vuelve más profunda; lo anterior está representado por una inversión de la sedimentación de carbonatos de plataforma profunda correspondientes a la Formación Tamaulipas Superior, a sedimentos de tipo turbidíficos de las Formaciones Cuesta del Cura, Indidura y Caracol.

Para el Turoniano-Cenomaniano, la región completa quedaría cubierta por aguas marinas (Padilla y Sánchez, 1985). Igualmente, a partir del Santoniano Tardío comenzaron a depositarse sedimentos terrígenos de talud correspondientes a la Formación Parras.

Los sedimentos previamente mencionados, fueron aportados debido a la erosión de la zona intra-Sierra Madre Oriental al oeste de la cuenca (Ye, 1997). Dicho evento es contemporáneo en tiempo, pero no en espacio, con el inicio de la Orogenia Laramide en la región occidental de México (Peterson, 2001).

Por otra parte, la Tectogénesis Laramide constituye el evento de mayor trascendencia para este tiempo. Lo anterior fue consecuencia de esfuerzos coaxiales compresivos, los cuales actuaron desde el borde continental pacífico. La deformación se llevó a cabo desde el Cretácico Tardío hasta el Eoceno Temprano e involucró movimientos verticales del basamento con mecanismos complejos, que deformaron los sedimentos de edad mesozoica y además cabalgaron bloques continentales estables pre-mesozoicos (Padilla y Sánchez, 1985). Lo anterior ocurrió probablemente como una consecuencia de la acreción de terrenos exóticos a los márgenes pasivos de México (Coney, 1983).

Además, durante la Tectogenia Laramide, aconteció un desplazamiento hacia el este y noreste del arco magmático. Mientras que, en el suroeste de Norteamérica, el magmatismo comenzó cerca del borde pacífico para finalmente migrar casi 1,000 kilómetros en el interior del continente producto de la subducción de ángulo bajo (Coney, 1983).

Posteriormente, a finales del Eoceno, se detuvo y regresó al oeste, para constituir, durante el Oligoceno–Mioceno, el volumen principal de rocas de arco de la Sierra Madre Occidental y del arco miocénico en Baja California (Damon et al., 1981).

#### **2.1.2.5 Cenozoico**

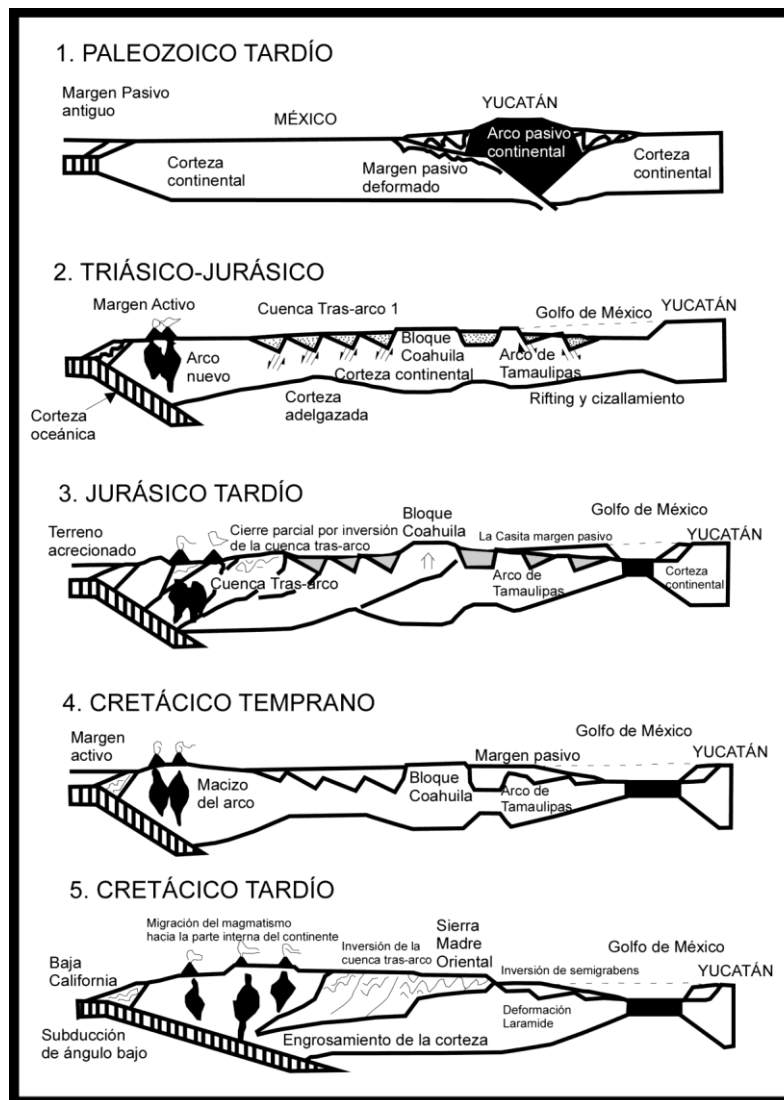
La secuencia mesozoica depositada en el noreste de México, fue deformada por la Tectogenia Laramide; mientras que los mares del Cenozoico en el este, dejaron tras de sí una vasta secuencia de sedimentos siliciclásticos (Padilla y Sánchez, 1986; Goldhammer, 1999).

Por otro lado, desde el Cretácico Superior, fueron generadas cuencas de antepaís, como lo son la Cuenca de Parras y la Cuenca de La Popa (Fig. 2-1). La primera, está caracterizada por una intensa deformación con pliegues apretados y alargados de edad laramídica; mientras que, la segunda posee diapiros salinos asociados a movimientos halocinéticos. Finalmente, el desarrollo de ambas se encuentra estrechamente relacionado con el origen de la Sierra Madre Oriental (Ye, 1997).

La Cuenca de Burgos de edad terciaria, por otra parte, fue originada después de la Tectogenia Laramide y está considerada como la continuación del umbral del Río Grande hacia el sur. Dicha cuenca, comenzó a ser llenada por sedimentos terrígenos y clásticos de los grupos Midway y Wilcox del Paleoceno-Eoceno Temprano, los cuales fueron depositados sobre un sistema de barra–barreras y deltas. Lo anterior, propició el desarrollo de vastas secuencias de arenas y lutitas (Padilla y Sánchez, 1986).

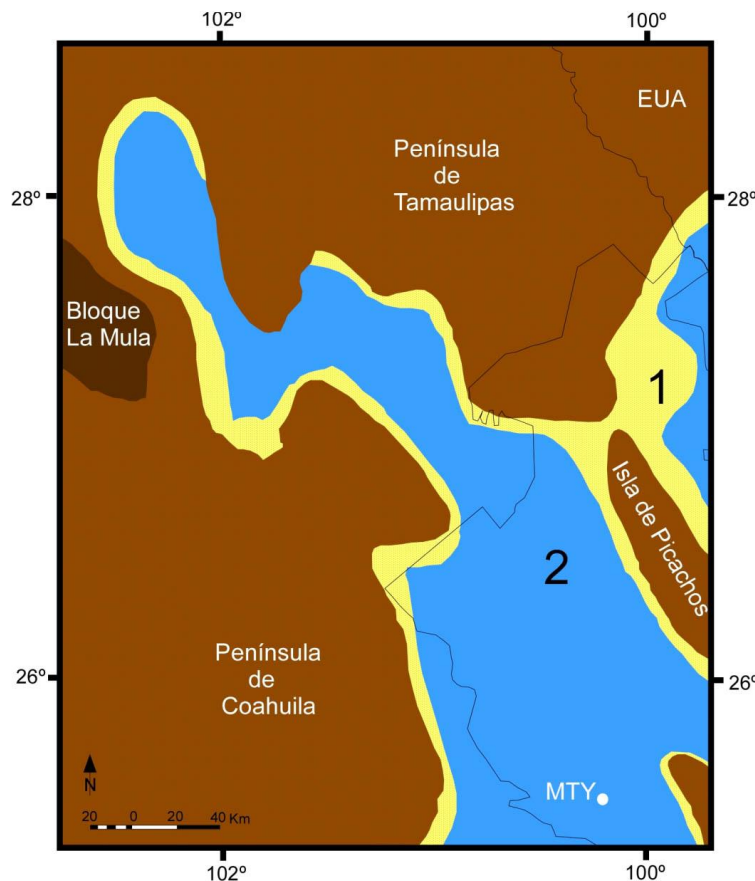
## **2.2 Paleogeografía del Noreste de México**

La disgregación del supercontinente Pangea, acaecida durante el Triásico Tardío, desarrolló un fallamiento de tipo normal que se encuentra estrechamente relacionado con la apertura del Golfo de México y que además controló la generación de altos y bajos del basamento, los cuales posteriormente tendrían gran influencia sobre la paleogeografía de esta región durante la Era Mesozoica en su parte tardía (Goldhammer, 1999).



**Fig. 2-1: Modelo de evolución tectónica para las provincias del este y oeste de México, las secciones se encuentran orientadas en una dirección Oeste–Este a través del noreste de México (Tomado de Goldhammer, 1999; sin escala).**

Por otra lado, en esta región del noreste mexicano existen tres principales secuencias deposicionales asociadas a las etapas de *rift*, deriva y antepaís de su evolución (Eguiluz de Antuñano, 2001).



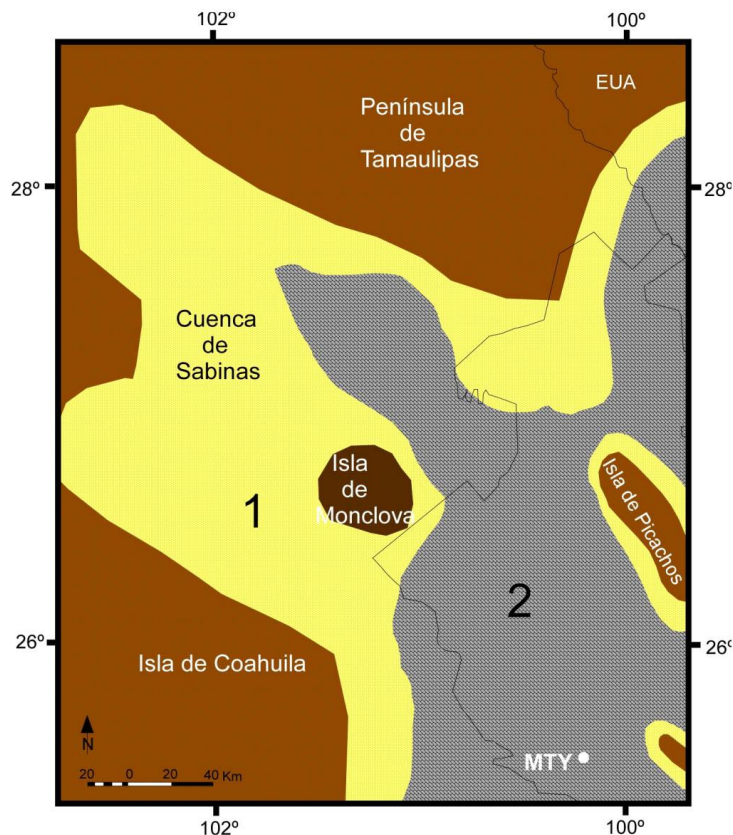
**Fig. 2-2: Paleogeografía para el Calloviano – Oxfordiano Inferior. (1) Fm. La Gloria, (2) Facies de *sabkha* de las Formaciones Minas Viejas y Olvido (Tomado de Eguiluz de Antuñano, 2001).**

posteriormente ser reemplazada por anhidrita y carbonatos, los cuales poseen un espesor combinado de 500 m; dichas unidades estratigráficas corresponden a las Formaciones Minas Viejas y Olvido (Humphrey & Díaz, 1956; Heim, 1926). Específicamente la Fm. Minas Viejas se compone principalmente por sal; mientras que, la Fm. Olvido es una mezcla de litologías: sus dos tercios inferiores consisten de anhidrita y carbonatos interdigitados, mientras que su parte superior está dominada por carbonatos de alta energía asignados a la siguiente supersecuencia. (Eguiluz de Antuñano, 2001).

Comenzando con la supersecuencia 1 que se compone de conglomerados, rocas terrígenas de coloraciones rojizas y verdosas de grano fino interdigitadas con sal, anhidrita y carbonatos; debido a su posición estratigráfica se puede observar que este período de deposición probablemente pudo haber acaecido durante el Calloviano (?) y el Oxfordiano Temprano (Goldhammer et al., 1991; Eguiluz de Antuñano, 2001; Fig. 2-2).

Por otra parte, hacia la Península de Tamaulipas, la sal comienza a decrecer en espesor o a desaparecer por completo, para

Así mismo, en las áreas adyacentes a los bloques de Coahuila, Monclova y La Mula, son notados cambios rápidos de facies desde carbonatos marinos y evaporitas (formaciones Minas Viejas y Olvido) hasta cuñas adelgazadas de areniscas litorales y conglomerados de la Fm. La Gloria. Sin embargo, la depositación del primer ciclo de la supersecuencia 1 ocurrió en un marco de *sabkha* y ambientes marinos costeros durante un período de subsidencia continua.

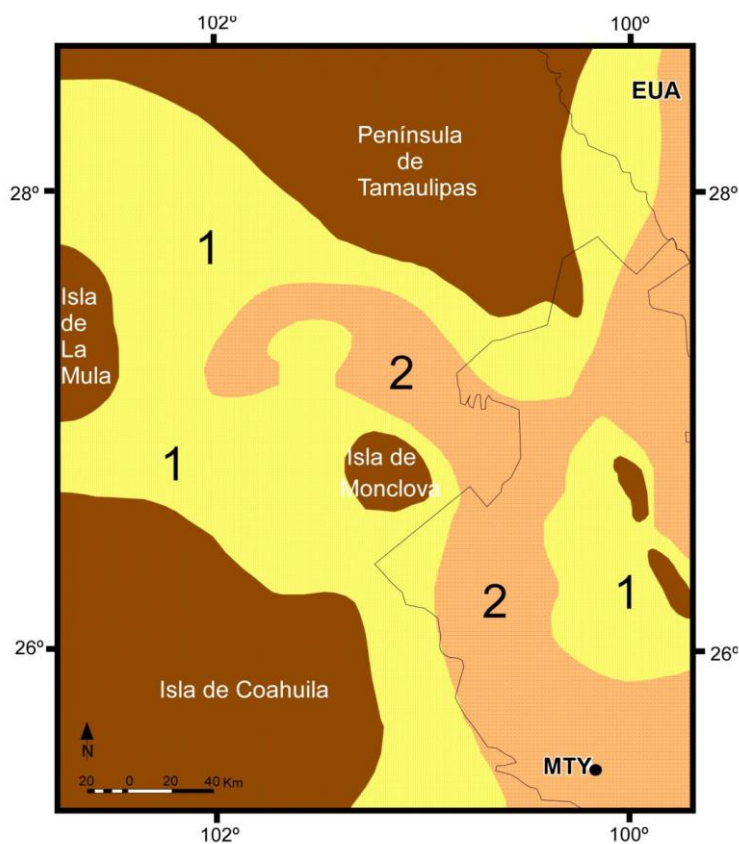


**Fig. 2-3: Oxfordiano Superior-Kimmeridgiense Inferior. (1) Fm. La Gloria, (2) Fm. Olvido (Tomado de Eguiluz de Antuñano, 2001).**

y consiste predominantemente de carbonatos de alta energía. El límite del ciclo superior está dado por un cambio en las litologías y la ausencia de fósiles del Valanginiense Inferior (Eguiluz de Antuñano, 2001).

Por otro lado, la supersecuencia 2 representa la etapa de deriva y comprende varios ciclos deposicionales (II, III, y IV). El primero corresponde a las edades de Oxfordiano Tardío hasta Berriasiano (Fig.2.3); el segundo abarca desde el Valanginiense hasta el Aptiano; mientras que el tercero, del Aptiano hasta el Cenomaniense. La base del ciclo II aparenta ser un límite erosional de secuencia representado por una zona brechada en la cima de las evaporitas de la Fm. Olvido. La zona brechada subyace al tercio superior de la Fm. Olvido

Además, el tercio superior de la Fm. Olvido consiste de carbonatos con nódulos de evaporitas, calcarenitas y *grainstones* oolíticos de alta energía depositados sobre una plataforma carbonatada compleja. Los ambientes marinos más profundos están representados hacia la cima de la Formación, donde los *wackestones* bioclásticos y *mudstones* predominan, y además contienen *Ataxioceras sp.* los cuales son amonites del Kimmeridgiano Inferior. Dichas unidades carbonatadas marcan un sistema transgresivo que gradúa hacia arriba en facies *onlap* costeras terrígenas de la Fm. La Gloria (Eguiluz de Antuñano, 2001).



**Fig. 2-4: Kimmeridgiano Medio: (1) Facies arenosas, (2) Fm. La Casita (tomado de Eguiluz de Antuñano, 2001).**

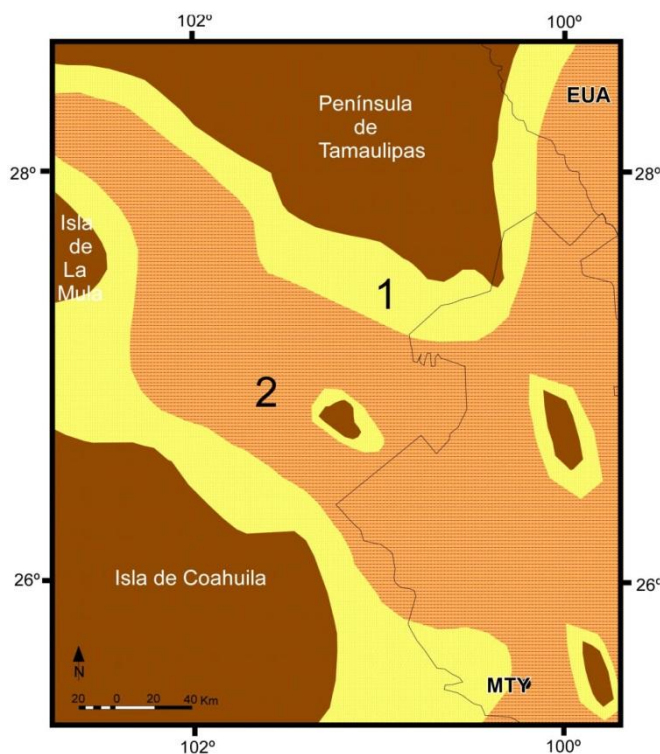
La Casita registran una transgresión continua e indican una gradual profundización de la cuenca.

Pero son las formaciones La Gloria y Olvido las que se encuentran cubiertas por lutitas carbonatadas de la Fm. La Casita, de la cual el miembro basal representa la superficie de máxima inundación cubriendo una amplia área que el ciclo precedente y además, contiene amonites de edad kimmerigiana. Es en esta región, donde la Fm. La Casita consiste de tres miembros: un miembro inferior de lutitas, un miembro medio de areniscas interdigitado con carbonatos y un miembro superior de lutitas. Dichas lutitas, carbonatos y areniscas de la Fm.



Asimismo, durante este tiempo, el límite noroeste fue inundado y el Bloque de La Mula fue rodeado por el mar. Probablemente las cuencas de Sabinas y Chihuahua estuvieron conectadas en este tiempo, mientras que, los bloques de Coahuila y Tamaulipas probablemente fueron separados por un canal marino (Eguiluz de Antuñano, 2001; Imlay, 1940).

Asimismo, ocurrieron ciclos de alta frecuencia durante el Kimmerigiano Medio al Titoniano (Fig. 2-4), pero en general fue mantenido un alto nivel del mar. La base de este ciclo sedimentario consiste de lutitas ricas en materia orgánica y carbonáceas depositadas en un ambiente nerítico exterior. La distribución de las facies más profundas y de espesor más grande de lutitas en la Fm. La Casita coincide con la posición de la sal subyacente pre-kimmerigiana (Fm Minas Viejas), y hacia arriba, la Fm. La Casita se va acuñando o cambiando a facies de arenas costeras (Eguiluz de Antuñano, 2001).



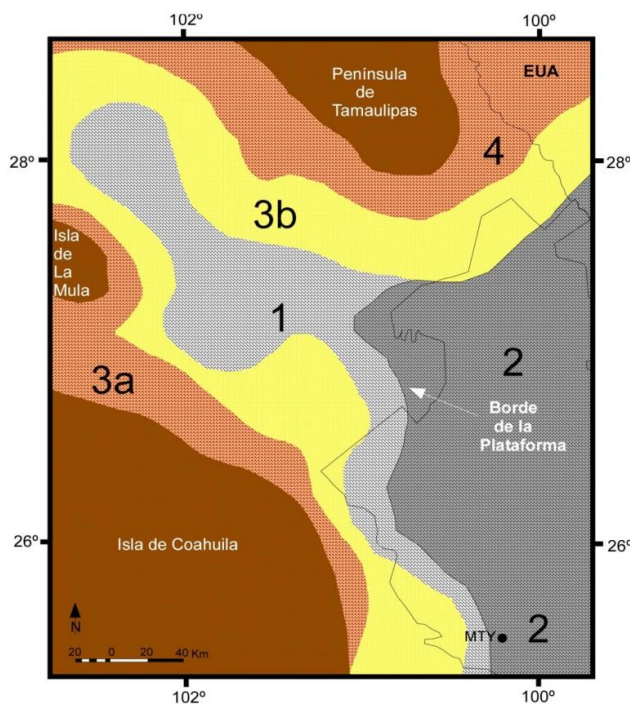
**Fig. 2-5: Reconstrucción paleogeográfica para el Titoniano (1) Arenas de anteplaya, (2) Fm. La Casita (tomado de Eguiluz de Antuñano, 2001).**

Específicamente, el miembro medio de areniscas de la Fm. La Casita se vuelve más grueso hacia los márgenes de los bloques de Coahuila y Tamaulipas, cambia de facies y se adelgaza hacia el centro de la Cuenca de Sabinas. Los ambientes reconocidos en las areniscas son neríticos medios a internos. Además se han encontrado fósiles de plantas que indican ambientes deltaicos (Eguiluz de Antuñano, 2001).

El espesor de la unidad arenosa media varía de 300 a 600 m. y la composición de las areniscas varía

desde litarenitas cerca del Bloque de Tamaulipas, hasta arcosas con abundantes clastos de microclina cerca de los bloques de Monclova y La Mula. El tamaño de grano decrece lejos del área de procedencia, cambiando de grano grueso/medio a fino/muy fino. Además predominan conglomerados texturalmente inmaduros en la proximidad del Bloque de Coahuila (Eguiluz de Antuñano, 2001).

La porción superior de la Fm. La Casita consiste de lutitas calcáreas negras y limolitas de 50 m de espesor que pueden representar una zona de inundación de alta frecuencia. El límite Jurásico-/Cretácico podría estar presente en esta unidad, pero es difícil de identificar litológicamente y está reconocido sólo a través de datos bioestratigráficos. La distribución areal de la Fm. La Casita varía con la edad, siendo limitada en el Kimmeridgiano y más ampliamente distribuida en el Titoniano (Fig. 2-5).

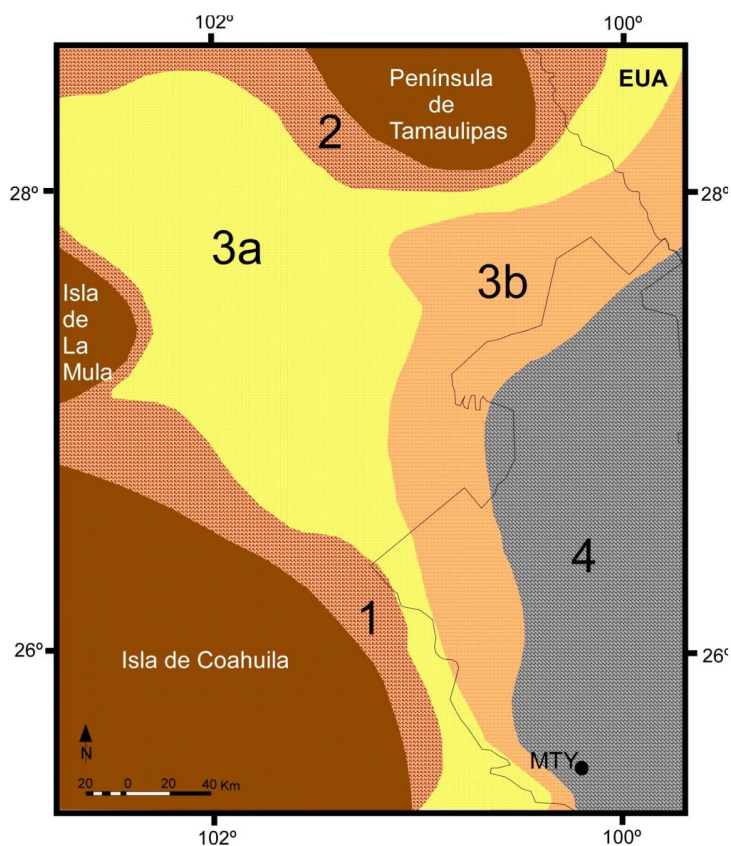


**Fig. 2-6: Paleogeografía para el Berriasiano, (1) Fm. Menchaca, (2) Fm. Taraises, (3a) Facies aluviales de la Fm. San Marcos, (3b) Facies deltáicas de la Fm. San Marcos, (4) Fm. Hosston (Tomado de Eguiluz de Antuñano, 2001).**

Existen carbonatos arcillosos y rocas terrígenas de tamaño de grano variable, los cuales fueron depositados durante el Berriasiano, pero es hacia el Bloque de Coahuila, donde prevalecen conglomerados de abanico aluvial de la Fm. San Marcos, mientras que, hacia el Bloque de Tamaulipas, predominan facies de planicie aluvial compuestas de areniscas y lechos rojos conglomeráticos (Fm. Hosston). Por otra parte, el Bloque de La Mula permaneció emergido, mientras que el Bloque de Monclova fue cubierto por el mar. Pendiente abajo, hacia el eje de la Cuenca de Sabinas, hubo una

plataforma carbonatada marina de alta energía representada por la Fm. Menchaca, la cual grada hacia el Sureste y Este en lutitas y carbonatos de la Fm. Taraises. Lo anterior está interpretado como una rampa de bajo ángulo (Eguiluz de Antuñano, 2001; Imlay, 1936, 1940).

Unos pocos arrecifes de corales y esponjas que rodearon el borde de la rampa están expuestos en el Cañón de la Huasteca en las cercanías de la Ciudad de Monterrey. Este ciclo puede representar un sistema de *highstand* y una plataforma progradante (Eguiluz de Antuñano, 2001; Vokes, 1963).



**Fig. 2-7: Paleogeografía para el Hauteriviano Inferior. (1) Fm. San Marcos, (2) Fm. Hosston, (3a) Arenas de anteplaya y (3b) Caliza arcillosa de la Fm. Barril Viejo, (4) Fm. Taraises (Tomado de Eguiluz de Antuñano, 2001).**

Por otro lado, la Fm. Menchaca es considerada como de edad berriasiense (Fig. 2-6), basada en la presencia de foraminíferos diagnósticos de esta edad (Imlay, 1940). Un ciclo nuevo (III) siguió a la depositación de esta Formación, con la acumulación de areniscas y rocas terrígenas de grano fino de la Fm. Barril Viejo (Imlay, 1940). Las fuentes de dichas rocas siliciclásticas fueron aparentemente los bloques expuestos de Coahuila y Tamaulipas. Las relaciones estratigráficas laterales son muy similares a las de la Fm. Menchaca. Hacia el límite del

Bloque de Coahuila, la Formación Menchaca es transicional dentro de los conglomerados de la Fm. San Marcos. Hacia el sureste y hacia el este del Bloque de Tamaulipas, ésta grada dentro de

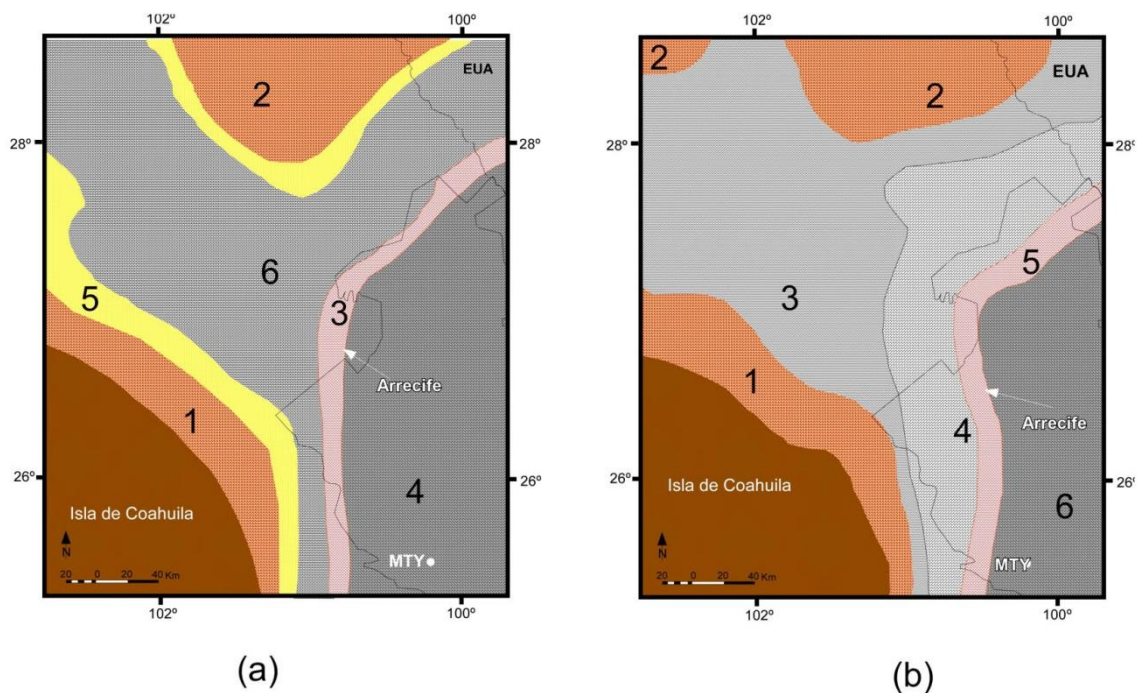
la Fm. Hosston y cruza una extensa plataforma tipo rampa. Hacia el Golfo de México ancestral, dicha Formación cambia a carbonatos arcillosos de la Fm. Taraises Superior. Mientras que, hacia la Cuenca de Chihuahua al noroeste, se vuelve transicional hacia areniscas fluviolacustres continentales de la Fm. Las Vigas (Burrows, 1910), esta unidad de areniscas arcólicas regresivas y limolitas fue depositada bajo un clima caliente húmedo. Así mismo, de acuerdo a Imlay (1940) y McKee (1990), la deposición de la Fm. Barril Viejo estuvo relacionada a la reactivación y levantamiento del Bloque de Coahuila. Sus facies corresponden a depósitos litorales. (Eguiluz de Antuñano, 2001).

En la Cuenca de Sabinas, la subsidencia continuó durante el Hauteriviano y Barremiano (Fig.2.7), y un cambio gradual en la sedimentación ocurrió en el tiempo. Además, la depositación carbonatada de la Fm. Padilla (Imlay, 1940), produjo un espesor promedio de 150 m.

Hacia la parte noroeste de la Cuenca de Sabinas y el Bloque de La Mula, existe un cinturón de rocas terrígenas de grano fino rojas a verdes de la Fm. La Mula (Imlay, 1940) que se adelgaza hacia mar abierto al este y sureste de la región. Esta unidad posee un espesor más grande hacia la Cuenca de Chihuahua donde es transicional a la Fm. Las Vigas. Ambas unidades cambian lateralmente dentro de rocas siliciclásticas gruesas de las formaciones Hosston y San Marcos, como hizo la Fm. Barril Viejo (Burrows, 1910; Eguiluz de Antuñano, 2001).

La Fm. Padilla, del Hauteriviano Superior (Fig.2.8), consiste de facies progradantes depositadas durante un nivel del mar alto y representa la plataforma inicial bajo las formaciones Cupido y La Virgen (Imlay, 1940). Esta última, consiste de evaporitas depositadas en un ambiente de *sabkha* carbonatado lagunar, mientras que la Fm. Cupido es un complejo de arrecifes de barrera que restringió la entrada de la salinidad normal del agua de mar dentro de la laguna; ambas Formaciones fueron depositadas como sistemas progradantes durante un alto nivel del mar (Eguiluz de Antuñano, 2001; Murillo- Muñetón, 1999).

La Fm. La Virgen alcanza un espesor de 600 a 800 metros y cambia de facies lateralmente a rocas terrígenas de las formaciones Hosston y San Marcos. Sin embargo, hacia la Cuenca de Chihuahua, los depósitos evaporíticos (Fm Cuchillo, Burrows, 1910) tienen continuidad lateral con la Cuenca de Sabinas, mientras que hacia el este y sureste del Arrecife Cupido, La Virgen es transicional a carbonatos pelágicos de la Fm. Tamaulipas Inferior y además contiene tres paquetes carbonatados dolomíticos separados por dos unidades evaporíticas.

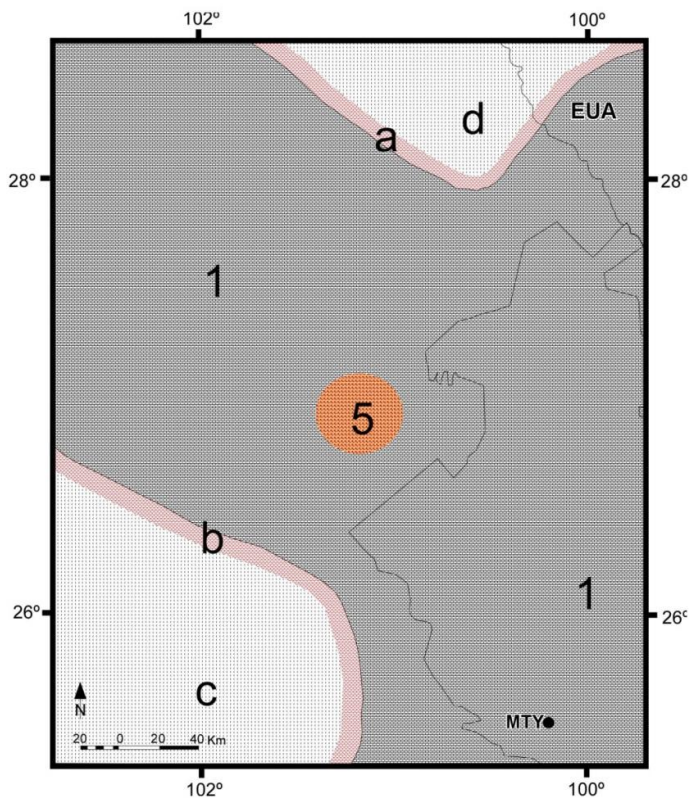


**Fig. 2-8: (a) Paleogeografía para el Hauteriviano Inferior, donde (1) Fm. San Marcos, (2) Facies de planicie aluvial de la Fm. Hosston, (3a) Facies de arenas de anteplaya y (3b) Caliza arcillosa de la Fm. Barril Viejo, (4) Fm. Tarieses. (b) Modelo paleogeográfico para el Hauteriviano Superior – Barremiano Inferior, donde (1) Fm. San Marcos, (2) Fm. Hosston, (3) Fm. La Mula, (4) Fm. Padilla, (5) Fm. Cupido, (6) Fm. Tamaulipas Inferior (tomado de Eguiluz de Antuñano, 2001).**

La continuación de la subsidencia en la Cuenca de Sabinas así como el incremento relativo del nivel del mar están representados por las lutitas y las calizas arcillosas de la Fm. La Peña (Imlay, 1936; Humphrey, 1949). Las facies de dicha formación corresponden a un ambiente de cuenca profundo que se desarrolló en el Aptiano Superior.

La depositación de los carbonatos micríticos de cuenca y las lutitas comenzaron en el Albiano y continuaron durante el Cenomaniano con tres unidades predominantemente carbonatadas (Tamaulipas Superior, Georgetown y Buda) interrumpidas por unidades de lutitas (Kamichi y Del Río).

La base de la Fm. Tamaulipas Superior está definida como una unidad tripartita compuesta de lutitas y calizas arcillosas que alcanzan un espesor de 150 m en las porciones central y noroeste. Aquí es más apropiadamente identificada como la Fm. Sombreritillo del Albiano Medio a Tardío (Bishop, 1970; Eguiluz de Antuñano, 2001).



**Fig. 2-9: Paleogeografía para el Albiano. (1) Facies de carbonatos de cuencas de las Formaciones Tamaulipas Superior- Georgetown, (2a) facies arrecifales Stuart City, (2b) Arrecife Viesca, (3) Fm. Acatita, (4) Fm. Macknight, (5) Fm. Monclava (Tomado de Eguiluz de Antuñano, 2001).**

Sobre la Fm. Sombreritillo se encuentra un intervalo de caliza micrítica de 80-150 m de espesor con nódulos de pedernal representando una plataforma abierta a condiciones de cuenca, su edad está determinada como del Albiano Tardío al Cenomaniano Temprano (Sellards et al., 1932; Eguiluz de Antuñano, 2001).

La segunda unidad superior arcillosa es la Fm. Del Río la cual consiste en un cuerpo de lutitas y areniscas de grano fino que poseen una edad del Cenomaniano Temprano. La unidad superior carbonatada, con un espesor de 10 a 50 m, corresponde a la Fm. Buda y

---

consiste de *mudstones* calcáreos de cuenca con fauna planctónica (Sellards et al., 1932; Eguiluz de Antuñano, 2001).

Por lo anterior, las cinco unidades previamente descritas cambian de facies hacia el suroeste y noreste de los bloques de Coahuila y Tamaulipas, los cuales estuvieron cubiertos durante este tiempo. Durante el Albiano, las plataformas restringidas desarrolladas estuvieron caracterizadas por ambientes marino-someros y depositación de evaporitas.

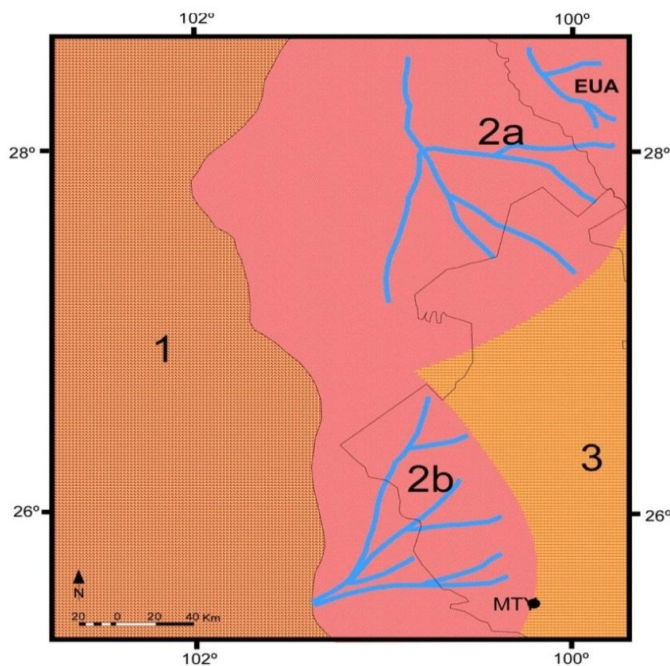
Desde el Aptiano hasta el Cenomaniano Temprano, extensas plataformas carbonatadas prevalecieron sobre los cuales carbonatos y evaporitas fueron depositados. Las plataformas de Coahuila y Maverick estuvieron caracterizadas por ciclos progradantes durante el Albiano Temprano (Fig.2.9), los cuales se volvieron acrecionarios hacia el fin de su existencia durante el Albiano Tardío y Cenomaniano Temprano (Eguiluz de Antuñano, 2001; Márquez, 1979; Smith, 1966).

Durante la mayor parte del Cretácico Tardío, los ciclos de depositación en esta región consistieron en secuencias regresivas y progradantes, en contraste con los ciclos precedentes del Jurásico al Aptiano y del Aptiano al Cenomaniano. Seis unidades formacionales construyen esta supersecuencia 3. En su base se encuentra la Fm. Eagle Ford seguida por la Caliza Austin, la Lutita Upson así como las formaciones progresivamente más gruesas y terrígenas como lo son San Miguel, Olmos y Escondido (Dumble, 1892; Eguiluz de Antuñano, 2001; Sellards et al., 1932).

Específicamente la Fm. Eagle Ford consiste en una serie de lutitas negras delgadas interdigitadas rítmicamente con calizas arenosas y areniscas cementadas con carbonatos. Existe un cambio de facies hacia la porción sureste, donde un gran componente carbonatado y una estratificación más gruesa han sido nombrados Fm. San Felipe. Pero es hacia el área de la Plataforma de Coahuila donde existe otro cambio de facies hacia lutitas calcáreas, calizas arcillosas y areniscas de la Fm. Indidura. Por otro lado la Fm. Eagle Ford representa un TST

depositado en un ambiente medio-nerítico y posee además una edad del Cenomaniano Tardío al Turoniano Temprano (Eguiluz de Antuñano, 2001).

Por otra parte, la Fm. Austin es una serie de lutitas calcáreas y calizas arcillosas ligeramente grises interdigitadas gruesas de 200 a 300 m de espesor con tufas interdigitadas delgadas expandidas. Los cambios de facies en esta Formación son similares a los descritos para la Fm. Eagle Ford, representando ambientes deposicionales similares. La principal diferencia entre las dos formaciones es el alto contenido de carbonatos de calcio en la Fm. Austin, causados por un cambio del clima y/o somerización de la plataforma durante el ciclo progradante, el cual se desarrolló sobre un alto nivel eustático. Dicha Formación posee una edad del Coniaciano-Santoniano.



**Fig. 2-10: Paleogeografía para el Campaniano-Maastrichtiano (1) Facies continentales de planicie Aluvial (2a) Complejo de facies deltáicas Nueva Rosita (2b) Complejo de facies deltáicas La Popa-Grupo Difunta (Taylor, Navarro, Midway, Wilcox y Gpo. Difunta) (3) Facies lutíticas pro-delta (Formaciones Parras-Méndez -Wilcox). (Tomado de Eguiluz de Antuñano, 2001).**

La Fm. Upson consiste de lutitas negras laminadas, de 100 a 150 m de espesor, con la misma distribución areal como las previas unidades del Cretácico Superior. Se correlaciona y es litológicamente indistinguible de la Fm. Parras en el sur. Su ambiente deposicional está interpretado como un prodelta dentro de un ciclo de inundación durante el desarrollo inicial de la cuenca de antepaís Laramide (Eguiluz de Antuñano, 2001; Imlay, 1936).

La Fm. San Miguel, de facies de frente deltaico de más de 400 m de espesor consiste en la alternancia de



arcillas y arenas en unidades progradantes, además está datada como del Santoniano Tardío al Campaniano Temprano (Fig.2.10). De acuerdo a los datos disponibles, el delta de San Miguel en el área de Nueva Rosita puede ser más antiguo que el delta de la Cuenca de La Popa (Eguiluz de Antuñano, 2001).

Por otro lado, la Fm. Olmos consiste de areniscas de grano medio a grueso, con un espesor típico en los canales distributarios y barras, y sin embargo, posee una edad campaniana.

Además, la Fm. Escondido consiste de areniscas conglomeráticas con diversas lutitas cíclicas y suturas de carbón cerca de su base, sugiriendo una planicie de inundación oscilatoria. La Fm. Escondido es correlacionada con las facies deltaicas de la Fm. Muerto del Grupo Difunta encontradas en la Cuenca de La Popa. Por su posición estratigráfica, la Fm. Escondido es asignada a una edad maastrichtiana; y para ese tiempo parece que en los deltas de Nueva Rosita y La Popa había emergido y progradado hacia el sinclinal Las Adjuntas al Sureste de Monclova (Eguiluz de Antuñano, 2001; Giles et al., 1999).

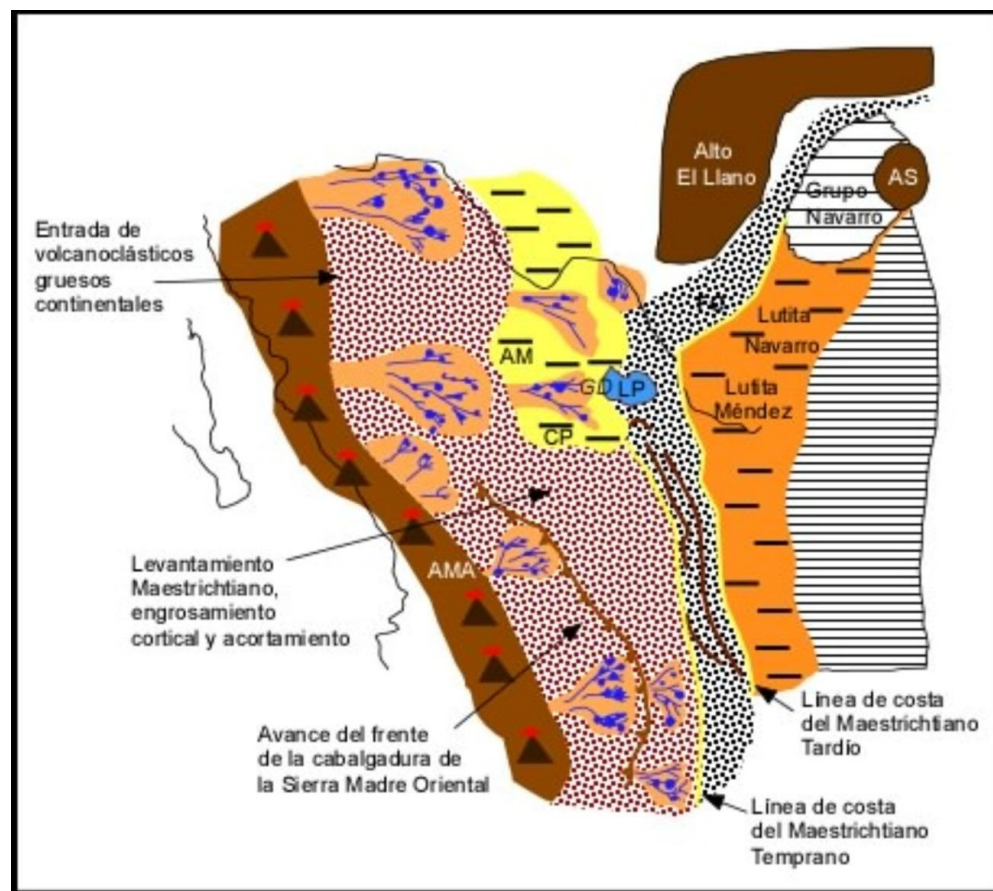
La presencia de estratos ypresianos en el área de la Cuenca de La Popa también sugiere que la región de Nueva Rosita experimentó una inundación marina post-Cretácica con condiciones de plataforma deltaica progradantes en el post-Ypresiano. Dicho evento aparentemente finalizó la sedimentación marina en la Cuenca de Sabinas. Por último, la sedimentación continental pudo haber continuado, convirtiendo a las turbas de la Fm. Escondido en carbón (Eguiluz de Antuñano, 2001; Vega-Vera & Perilliat, 1989).

## **2.2 Cuencas de Parras y La Popa**

El noreste de México se caracteriza por presentar secuencias sedimentarias que van del Terciario al Reciente; de estos depósitos, los correspondientes al Cretácico constituyen el mayor porcentaje en área de afloramiento. Hacia la mitad del Cretácico Tardío, se presentaron eventos de subsidencia diferencial que generaron cuencas en las que fueron depositados sedimentos erosionados de los elementos positivos ubicados hacia el Oeste y Suroeste de la porción

nororiental de México produciendo espesores de hasta 1,500 m de lutita marina llamada actualmente Lutita Parras (Weidie & Murray, 1961).

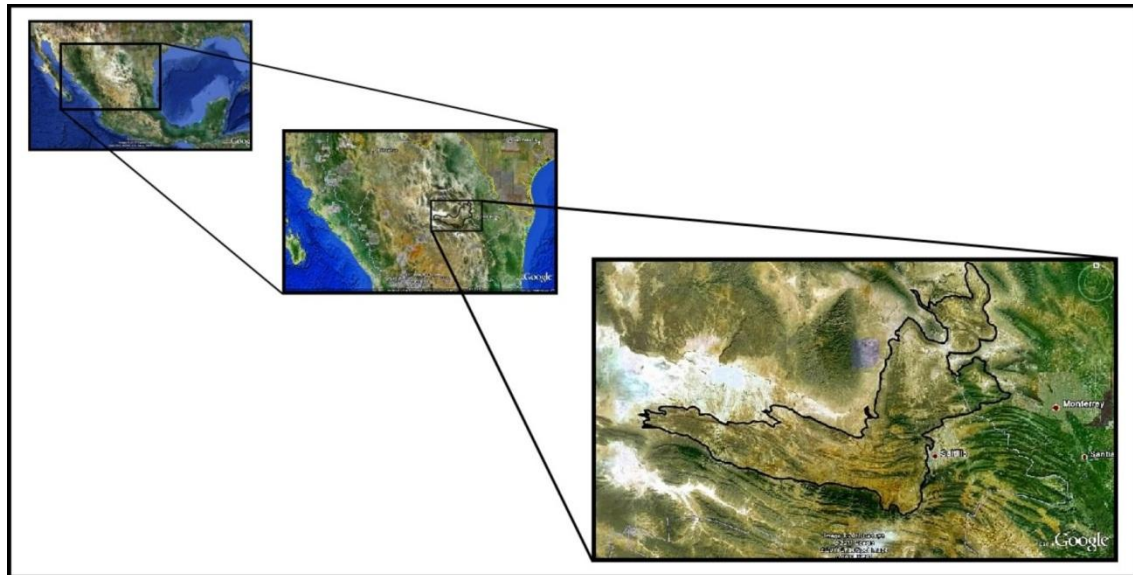
El continuo levantamiento de las tierras occidentales propició el desarrollo de sistemas fluviales que acarrearón grandes cantidades de sedimentos depositados en sistemas deltaicos a lo largo de la costa del Golfo de México ancestral. Este patrón de depósito continuó desde el Campaniano hasta el Eoceno Temprano ocasionando el relleno de dos cuencas sedimentarias (Parras y La Popa), que representan una de las unidades litológicas más importantes del noreste de México: el Grupo Difunta (Vega-Vera et al., 1989; Fig. 2-11).



**Fig. 2-11: Paleogeografía para el Maastrichtiano, período en el cual, diversos sistemas fluviales transportaron y depositaron sedimentos en la región noreste de México (tomado de Goldhammer, 1999). LP= Cuenca de La Popa, GD = Grupo Difunta, CP = Cuenca de Parras, AM = Antepaís del Maastrichtiano, AMA = Arco Magmático Alisitos, AS = Alto Sabine.**

### 2.3 El Grupo Difunta

El Grupo Difunta es una secuencia del Cretácico Superior – Terciario que abarca una parte de los Estados de Nuevo León y Coahuila, y se extiende desde el oriente de Parras, Coah., hasta el norponiente de la Ciudad de Monterrey, N.L. El Grupo está delimitado al Sur y al Oeste por el frente estructural de la Sierra Madre Oriental, al Norte por la Plataforma de Coahuila y la Cuenca de Sabinas y al Este por el Cinturón Plegado Marginal de Coahuila (Vega Vera et al., 1989). Los sedimentos terrígenos que componen el grupo fueron producto de la aportación fluvial en un sistema de deltas cuyas fuentes de aporte se encontraban al surponiente, poniente y norponiente, respecto a las áreas de depositación (McBride et al., 1974).



**Fig. 2-12: Localización geográfica del Grupo Difunta entre los Estados de Coahuila y Nuevo León en la región noreste de México (Imagen obtenida con el programa Google Earth, 2010; modificada).**

En 1936 Imlay describió la Formación Difunta, cuya localidad tipo ubicó en las cercanías del Cerro La Difunta, en el flanco sur de la Cuenca de Parras, en el Estado de Coahuila. Posteriormente Murray et al. (1962), estudiaron esta misma localidad cuando formalizaron al Grupo Difunta dividiéndolo en siete formaciones con base en la presencia de capas rojas y asignándole una edad maastrichtiana para la mayor parte del grupo debido a la presencia de *Exogyra costata* y *Sphenodiscus pleurisepta* (Vega-Vera & Perrilliat, 1989).

El Grupo Difunta sobreyace a la Lutita Parras del Cretácico Superior, una formación de color grisáceo de cerca de 1,500 m de espesor, que se compone de arcillas con un 10 % de limolitas interdigitadas. Al Grupo Difunta le sobreyace el aluvión cuaternario el cual está truncado por la erosión superficial moderna.

La litología del grupo presenta cuatro fases regresivas y tres transgresivas (Laudon, 1984), las primeras ocasionadas por progradaciones deltaicas, y por eventos de subsidencia diferencial las segundas. Esta sedimentación dio como resultado un espesor compuesto aproximado de 5 000 metros de rocas clásticas (McBride et al., 1974). Las fases regresivas propiciaron la oxidación de los sedimentos de planicie deltaica bajo un régimen semihúmedo – semiárido, ocasionando la coloración que caracteriza a las capas rojas de algunas formaciones (McBride, 1974). Fue precisamente la existencia de capas rojas, el criterio utilizado por Murray et al. (1962) y por McBride et al. (1962) para proponer una división del grupo en formaciones. Inicialmente el alcance estratigráfico del Grupo Difunta fue considerado como del Campaniano – Paleoceno en la Cuenca de Parras y del Maastrichtiano en la Cuenca de La Popa (McBride et al., 1975; Wolleben, 1977; Laudon, 1984).

Por otra parte, McBride et al. (1974) publicaron un estudio sobre la estratigrafía y estructura del Grupo Difunta, al cual subdividieron en dos cuencas sedimentarias denominadas Parras y La Popa, integradas por un total de 13 formaciones, con un alcance estratigráfico Campaniano-Paleocénico en el sector de la Cuenca de Parras y, una edad maastrichtiana para las cinco Formaciones integrantes de la Cuenca de La Popa (Vega-Vera y Perrilliat, 1989b).

Posteriormente Murray et al. (1962), definieron siete formaciones para el Grupo Difunta en la Cuenca de Parras (Cerro del Pueblo, Cerro La Huerta, Cañón del Tule, Las Imágenes, Cerro Grande, Las Encinas y Rancho Nuevo); la más antigua (Cerro del Pueblo) tiene una edad campaniana, dada la presencia de *Exogyra ponderosa*; sin embargo, las capas superiores de esta formación contienen *Exogyra costata*, la cual sugiere una edad maastrichtiana. La parte superior de la formación más joven en la Cuenca de Parras (Rancho Nuevo) presenta nautiloideos

---

(*Cinomia haltomi* y *Hercologlassa sp.*) que conjuntamente con la carencia de fósiles diagnósticos del Cretácico, permiten asignar una edad midwayana (Vega-Vera y Perrilliat, 1989b).

Por otro lado, McBride et al. (1974) añadieron seis formaciones a las siete propuestas para la Cuenca de Parras; de estas seis, una (Formación Tanque) es asignada a la parte oriental de Parras y cinco a la Cuenca de La Popa (en orden decreciente de antigüedad: Muerto, Potrerillos, Adjuntas, Viento y Carroza). Todas las unidades anteriores son atribuidas al Maastrichtiano, con base en la presencia de *Exogyra costata* y *Sphenodiscus pleurisepta*, que son índices de dicha edad en los depósitos cretácicos de las provincias del Golfo y del Atlántico (Vega-Vera y Perrilliat, 1989b).

Finalmente, Vega-Vera & Perrilliat (1989) realizaron algunas prospecciones en la Cuenca de La Popa que produjeron fósiles diagnósticos del Eoceno Temprano (Ypresiano) en la Fm. Adjuntas. Se encontraron *Venericardia planicosta* y *Turritella mortoni postmortoni* que permitieron asignar una edad ypresiana a la Fm. Adjuntas, sugiriendo que la Cuenca de La Popa contenía las formaciones más jóvenes del Grupo Difunta (Adjuntas, Viento y Carroza). Ésto implica que las hipótesis de correlación entre las dos cuencas del grupo, propuestas por McBride y colaboradores quedaron invalidadas, pues la Fm. Las Imágenes (Maastrichtiano, Parras) no puede ser correlacionable temporalmente con Las Adjuntas (Ypresiano, La Popa), ni tampoco la Fm. Las Encinas (Maastrichtiano, Parras) con la Fm. Carroza (post-Ypresiano, La Popa), por lo que el alcance estratigráfico del Grupo Difunta en la Cuenca de La Popa se amplía hasta el Eoceno (Vega-Vera & Perrilliat, 1989).

Los primeros reportes de estratos terciarios en el Grupo Difunta fueron elaborados por compañías petroleras privadas antes de la expropiación y sitúan a rocas del Eoceno en las inmediaciones de Paredón, Coahuila. Murray et al. (1959) rectificaron la edad de estos estratos, asignándolos al Cretácico Tardío, ya que la prospección en dicha zona produjo únicamente fósiles de esa época y reportaron una localidad terciaria cercana a Rancho Nuevo, Coah., sugiriendo que la deformación de los estratos cretácicos y terciarios en esta zona hubiera comenzado durante el Paleoceno Tardío.

Más tarde, Weidie & Murray (1967) señalaron que se desconoce la duración y extensión del Grupo Difunta, dado que la erosión ha removido una gran parte de la porción superior del grupo (Vega Vera & Perrilliat, 1989).

Wolleben (1977) publicó un estudio paleontológico que comprende las especies de fósiles invertebrados recolectados en diferentes formaciones del Grupo Difunta, rectificando una edad maastrichtiana para las formaciones en la Cuenca de La Popa y señalando que el establecimiento de una zonificación entre las dos cuencas es necesaria para proponer correlaciones cronoestratigráficas locales. Posteriormente, Mitre Salazar (1981) realizó un estudio detallado de la zona, con base en una imagen LANDSAT que abarca la Cuenca de La Popa y parte de la Cuenca de Parras. Por su parte, Laudon (1984) publicó un trabajo sobre dos cuerpos diapíricos presentes en la Cuenca de La Popa, proponiendo una hipótesis acerca de su origen y relación con la geología estructural de la zona. Por otro lado, Vega-Vera & Perrilliat (1985) reportan las especies de moluscos correspondientes a la Fm. Potrerillos de la cuenca en estudio, siendo nombrados por primera vez varios taxos en el Grupo Difunta, y proporcionan además, información acerca del ambiente de depósito de las unidades estudiadas. Por último, Vega-Vera y Perrilliat (1985) describieron una especie nueva de cangrejo fósil para la Fm. Potrerillos de la Cuenca de La Popa, siendo el primer reporte de este género en América (Vega-Vera & Perrilliat, 1989b).

En octubre de 1986, en los estratos grises de la Fm. Adjuntas se encontraron las especies *Turritella mortoni postmortoni* y *Venericardia planicosta*. El alcance estratigráfico de estas especies de moluscos corresponde al Eoceno Temprano (Ypresiano o Wilcox) en los depósitos de la planicie costera del golfo (Shimer & Shrock, 1944). En la Fm. Viento suprayacente, se encontraron fragmentos de madera fósil, sin ningún índice que pudiera determinar la edad de esta formación (Vega Vera & Perrilliat, 1989b).

La existencia de formaciones más jóvenes en la Cuenca de La Popa hace pensar que las unidades terciarias correlacionables de la Cuenca de Parras fueron erosionadas, o que el aporte sedimentario de Parras se inactivó a fines del Cretácico (Maastrichtiano) o principios del

Terciario (Paleoceno). La edad inferida a partir de los fósiles de la Fm. Ajuntas permite ampliar el alcance estratigráfico del Grupo Difunta en la Cuenca de La Popa (Vega-Vera y Perrilliat, 1989b; Fig. 2-13).

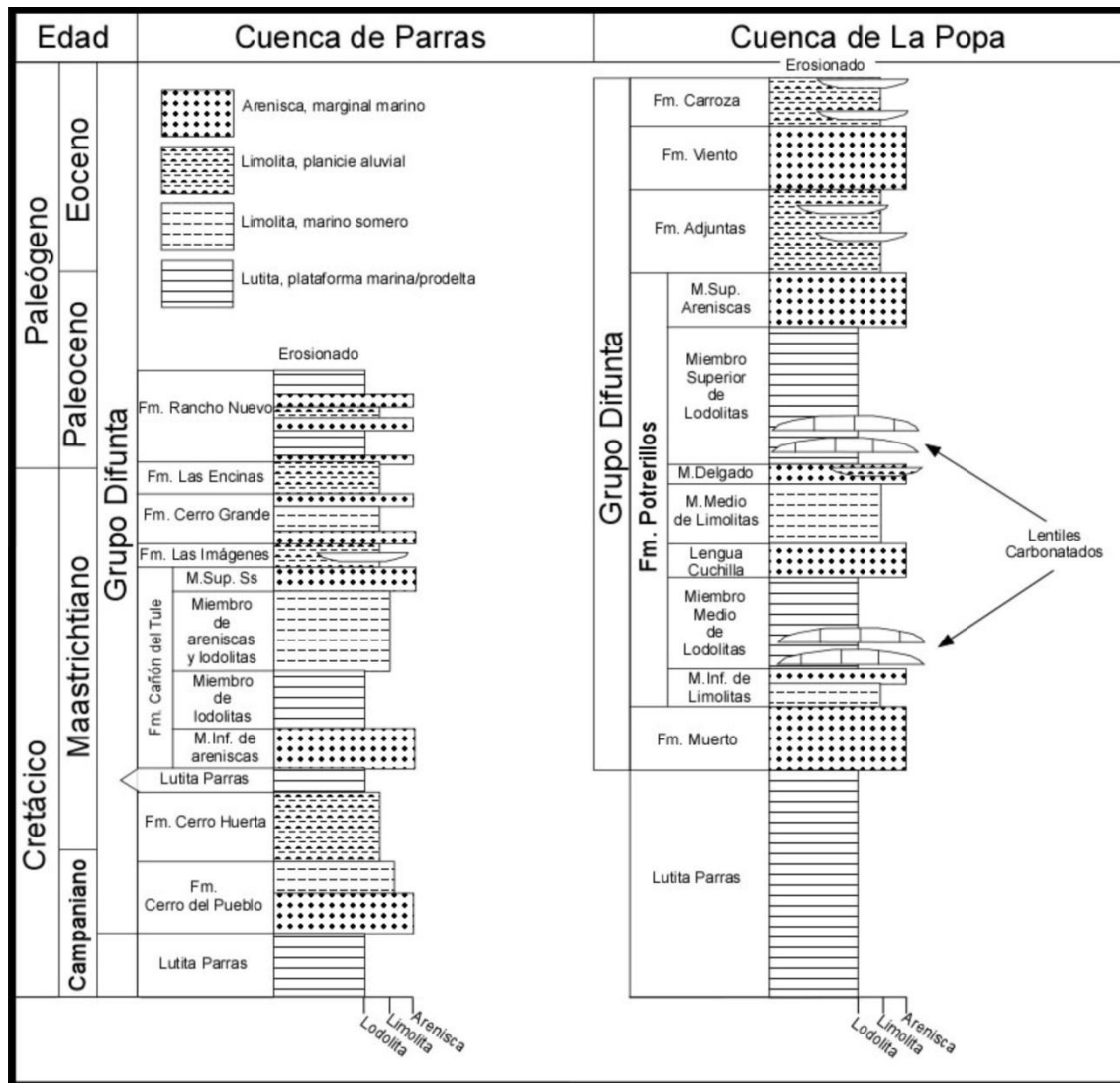
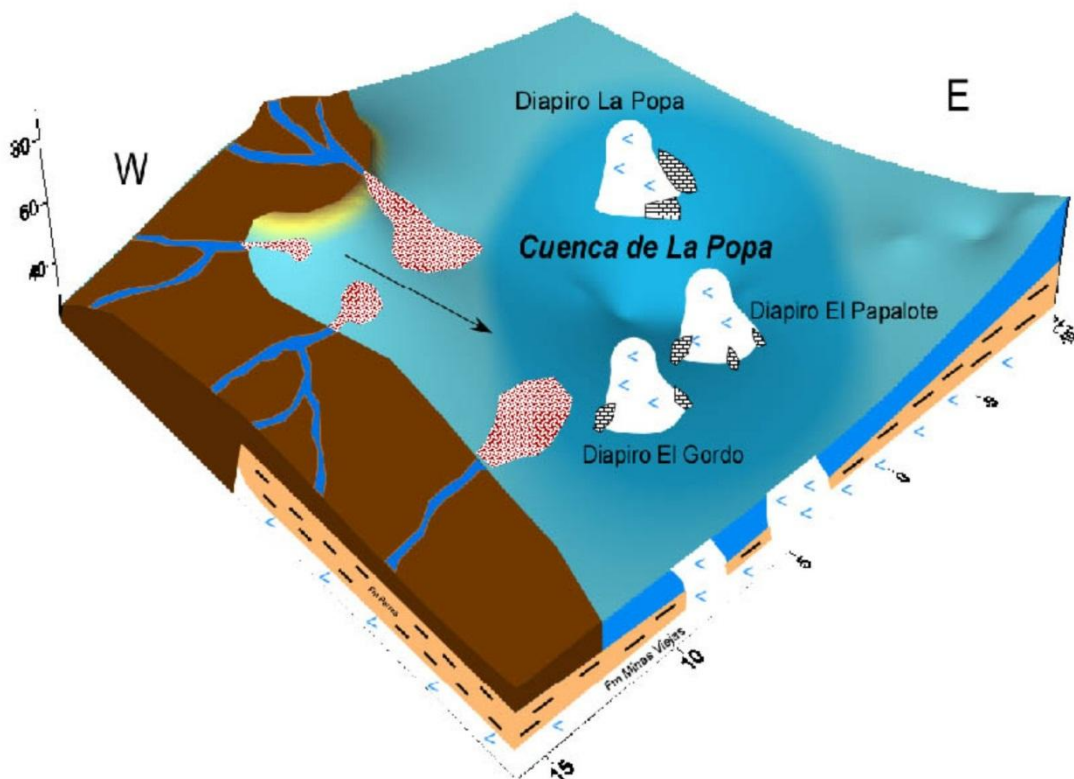


Fig. 2-13: Columna estratigráfica para las cuencas Parras y La Popa (Tomado de Lawton et al., 2009).

## 2.4 La Formación Muerto

Al sur del Arco de San Marcos, durante el Campaniano Tardío, comenzó a depositarse un influjo de detritos sinorogénicos que continuaría hasta el Maastrichtiano formando los estratos preservados correspondientes al Cretácico Superior en el Noreste de México (Sohl et al., 1991). Como resultado de la contracción Hidalgoana se presentaron pliegues de piel delgada en el umbral del Río Grande. Dicha deformación dataría la depositación de la Fm. Muerto como resultado de la fragmentación del antepaís hidalgoano en tres cuencas estructurales: Sabinas, Parras y La Popa.



**Fig. 2-14: Modelo Depositional del inicio de la depositación del Grupo Difunta así como la formación de lentes carbonatadas asociados a los diapiros mientras estos continúan creciendo. (Maastrichtiano). (Tomado de Martínez López, 2009).**



Específicamente, durante el Maastrichtiano en el noreste de México se produjo un aumento en el flujo de sedimentos desde el creciente orógeno hidalgoano, lo que produjo el desarrollo de sistemas deltaicos elongados que progradaron hacia el Este a lo largo del eje de la cuenca de antepaís hidalgoana. Dicho flujo de detritos ocasionó la migración de la línea de costa maastrichtiana sustancialmente hacia el Este desde su posición campaniana. Los estratos resultantes formaron una gruesa secuencia de depósitos marinos y deltaicos, considerados como los primeros sedimentos sinorogénicos de grano basto significativos en el sistema de cuencas del antepaís hidalgoano (McBride et al., 1974).

En la Cuenca de La Popa, la Fm. Muerto representa el primer influjo mayor de detritos de grano grueso (Fig. 2-14). Su localidad tipo se encuentra al sur del Sinclinal Delgado donde tiene un espesor de 570 metros cambiando su espesor dramáticamente en la vecindad de los diapiros. Consiste de areniscas interdigitadas con limolitas y lutitas; están presentes también en las areniscas abundantes restos de *Ophiomorpha* e inocerámidos así como amonites. En general representa un sistema deltaico dominado por las olas (Lawton et al., 2001; McBride et al., 1973, 1975) que consiste en depósitos de playa, plataforma litoral, mareal y lagunar que constituyen un inmenso sistema costero clástico progradacional (Weislogel, 2001). Por otra parte, Weidie (1969) interpretó estas rocas como depósitos de barra submarina (Fig. 2-15).

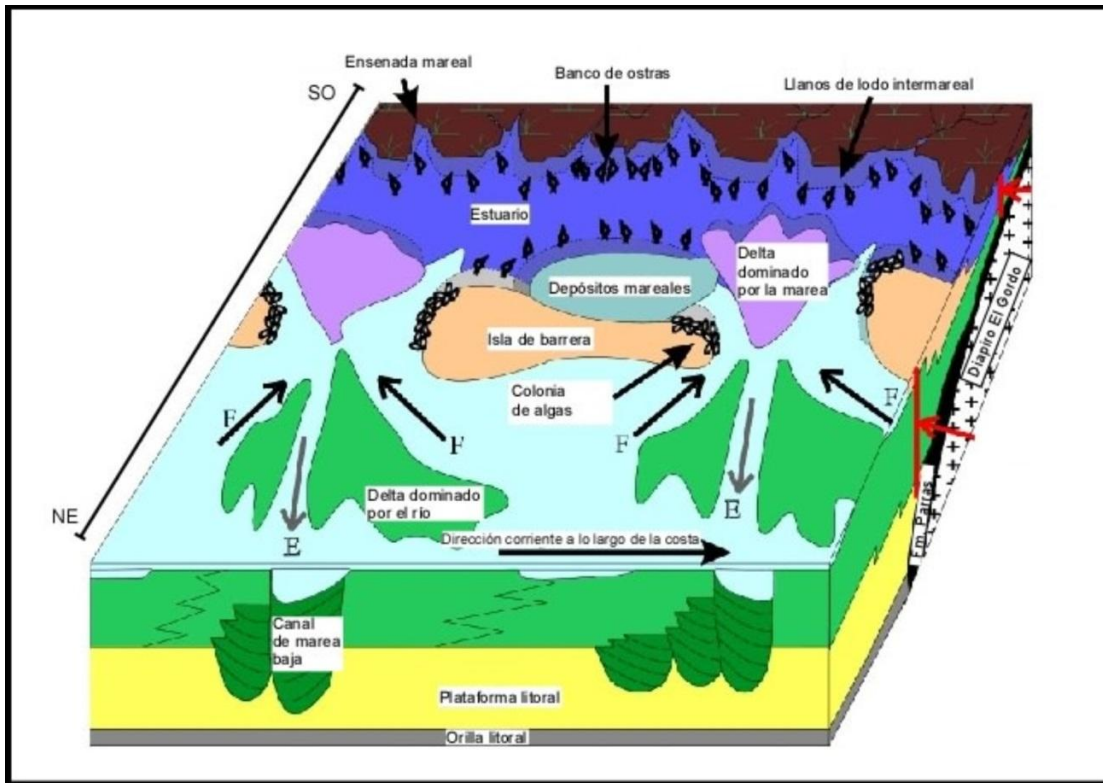


Fig. 2-15: Diagrama de bloque para el ambiente deposicional de la Fm. Muerto basado en Weislogel & Lawton (2000), McBride et al. (1974), Radack (1986) y Halik (1988); (Tomado de Weislogel & Lawton, 2000).

Las tendencias en el espesor regional de la Fm. Muerto y de los depósitos equivalentes a través de todo el antepaís (Fig. 2-16), exhiben una asimetría en el espesor que va desde los 410 m. en la parte sur de la Cuenca de Sabinas a los 1,325 m. en la parte sur de la Cuenca de Parras, adyacente a la Curvatura de Monterrey. Por otra parte, en la Cuenca de La Popa, el espesor de la Fm. Muerto en su localidad tipo es de 570 m. (McBride et al., 1974).



**Fig. 2-16: Distribución de la Fm. Muerto en la Cuenca de La Popa y zonas adyacentes cercanas a la Curvatura de Monterrey (Modificado de Google Earth).**

### 3 Geología Local

#### 3.1 Áreas de Estudio

Se estudiaron cinco localidades ubicadas estratégicamente en la Cuenca de La Popa (Fig. 1-1) y dos localidades fuera de dicha cuenca (LF), dos de ellas ubicadas cerca de cuerpos salinos (BP y EG), una en el extremo norte (MM), una en la localidad tipo (ED) y otra en el extremo occidental de la cuenca (LP), además de una localidad adicional en la Cuenca de Parras: Microondas Mariposa (Ma).

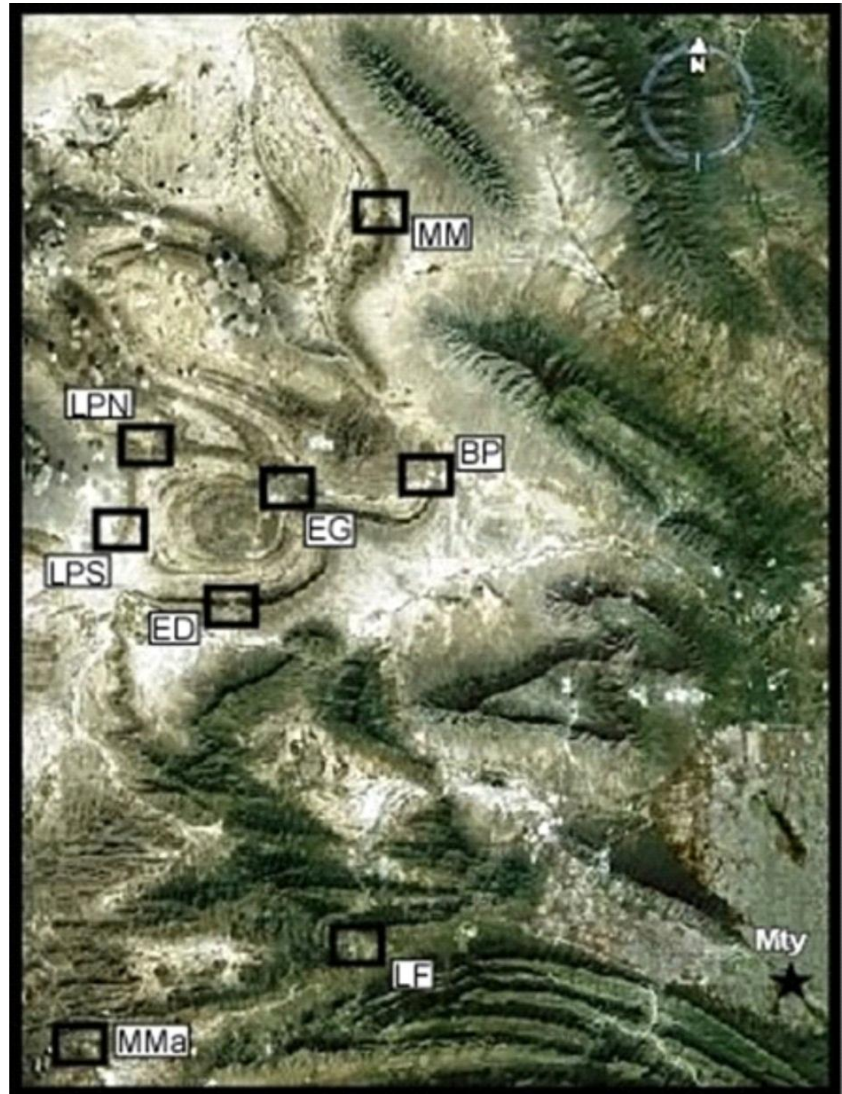


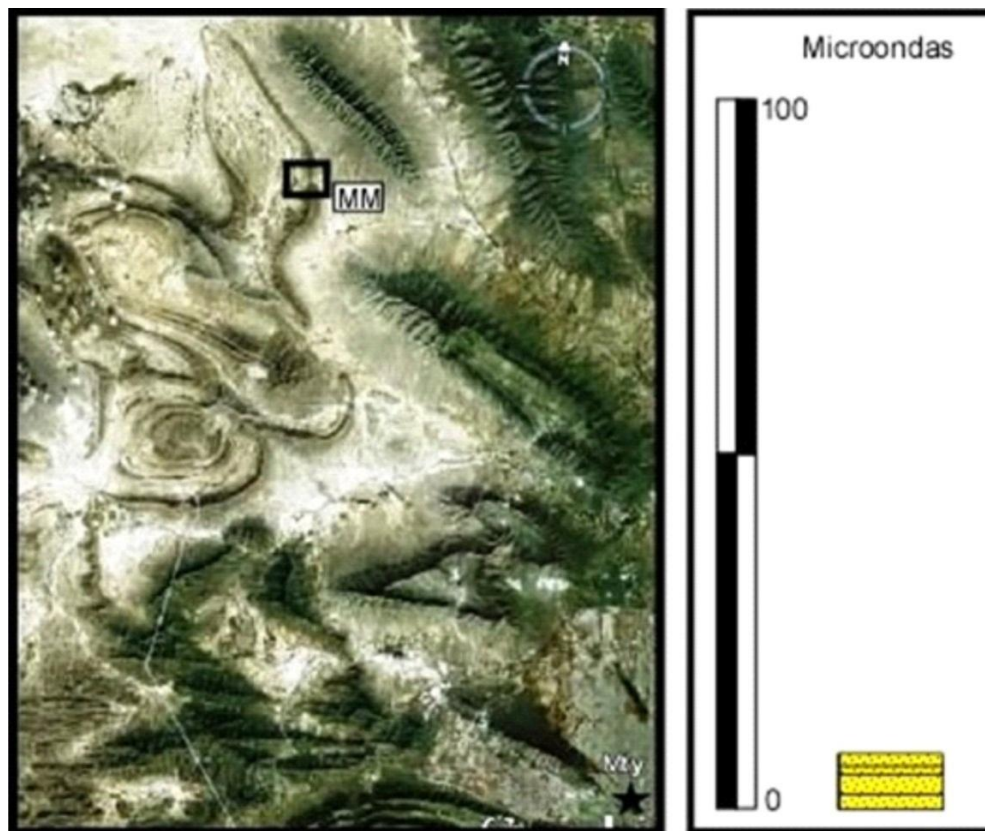
Fig. 3-1: Ubicación de las localidades estudiadas (Tomada de Google Earth, 2011).

### 3.1.1 Sección Microondas (MM)

**Ubicación:** Extremo norte de la Cuenca de La Popa fuera de toda influencia salina.

**Espesor:** 25 metros (Fig. 3-2).

**Descripción:** Areniscas y coquinas principalmente de grano fino a medio color grisáceo en estratos competentes conformados por areniscas e incompetentes por coquinas. Además, presenta laminación paralela y cruzada, rizaduras y laminación en forma de espina de pescado y gran abundancia de gasterópodos en los niveles superiores. La bioturbación presente está constituida por *Ophiomorpha* en gran abundancia. Esta localidad se caracteriza por ser una de las de menor espesor de la Fm. Muerto.



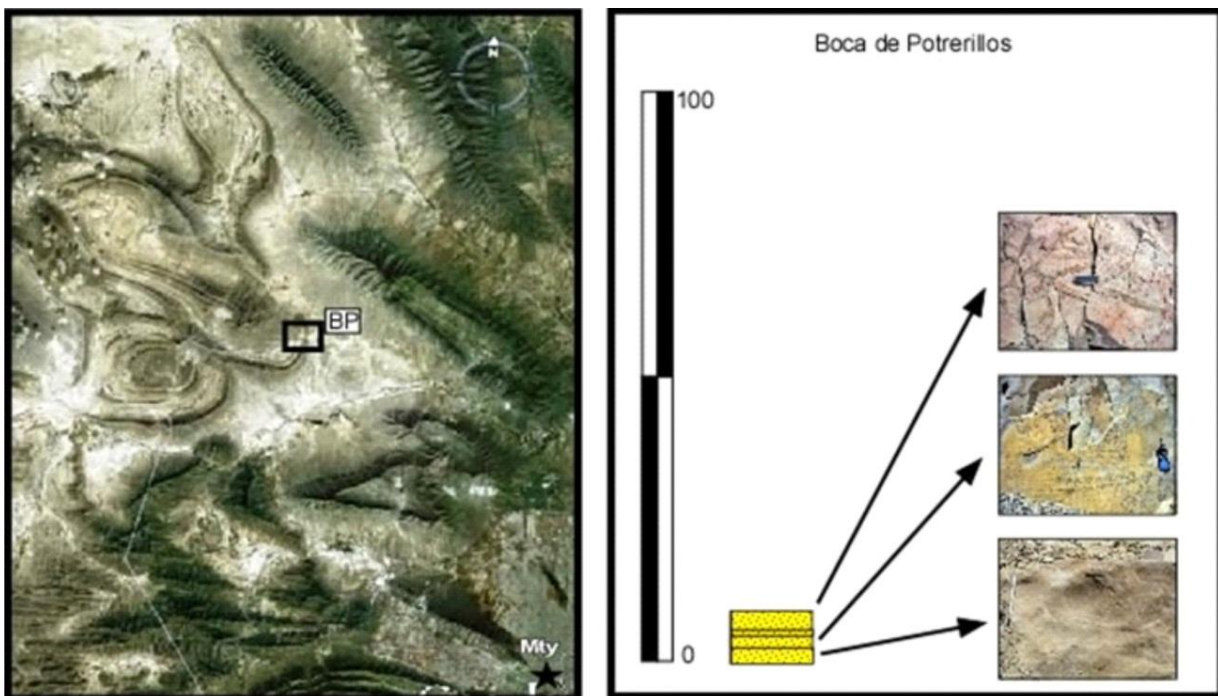
**Fig. 3-2:** Ubicación y perfil estratigráfico de la localidad Microondas al norte de la Cuenca de La Popa.

### 3.1.2 Sección Boca de Potrerillos (BP)

**Ubicación:** Límite este de la cuenca al paso de la soldadura salina.

**Espesor:** 8.87 metros.

**Descripción:** Areniscas de grano fino a medio con coloraciones grisáceas. Presentan laminación fina cruzada y paralela, rizaduras además de espina de pescado. Posee también bioturbación por *Ophiomorpha* en manera abundante. Contiene además, restos de *Exogyra sp.* Las estructuras sedimentarias en esta localidad se presentan en menor medida que en las demás localidades, lo cual sugiere un ambiente de depositación más tranquilo o quizá de mayor profundidad a diferencia de las demás localidades estudiadas (Fig. 3-3).



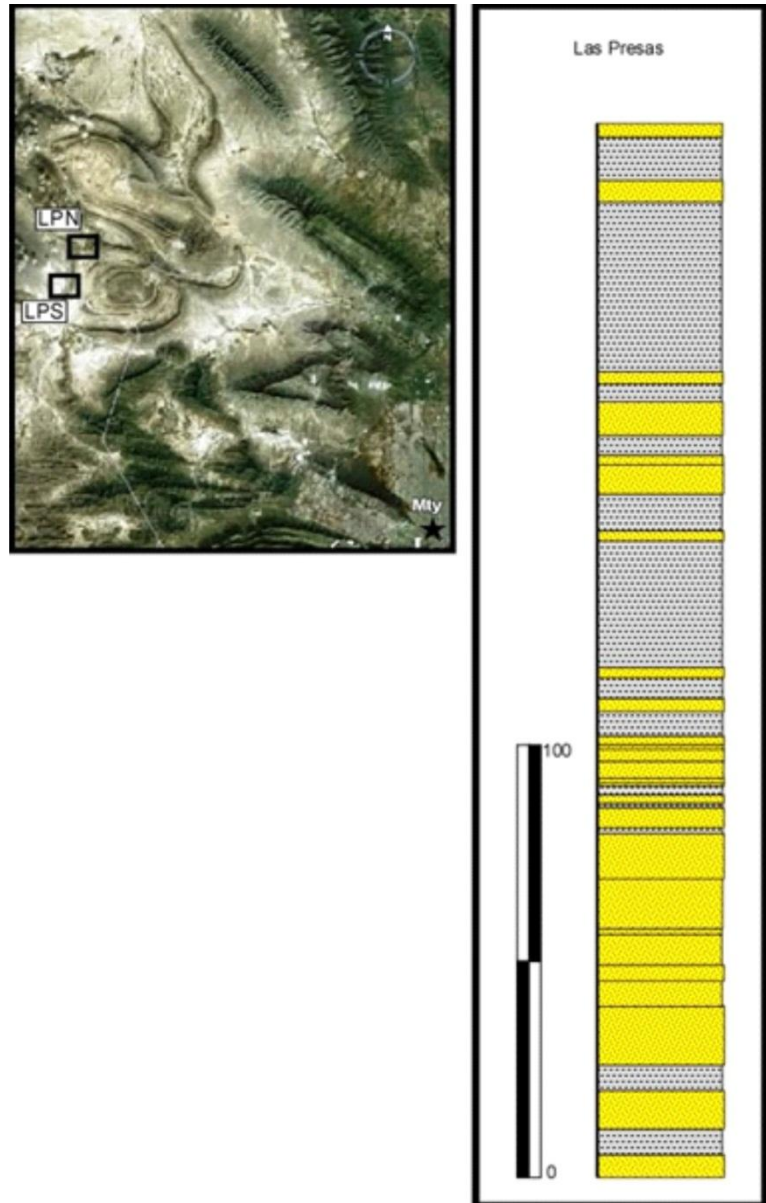
**Fig. 3-3:** Localización y perfil estratigráfico de Boca de Potrerillos al este de la Cuenca de La Popa. En la imagen de la derecha, de arriba hacia abajo: Bioturbación (*Ophiomorpha*), laminación cruzada y rizaduras en la Fm. Muerto.

### 3.1.3 Sección Las Presas (LPS)

**Ubicación:** Extremo occidental de la cuenca, al norte del Sinclinal Delgado (Fig. 3-4).

**Espesor:** 292 metros.

**Descripción:** Areniscas, lutitas y limolitas de grano fino, medio a grueso con coloraciones grisáceas. Presentan laminación fina paralela además de marcas de carga. Contiene también madrigueras del tipo *Ophiomorpha*, gasterópodos y bivalvos como *Exogyra sp.* Es la segunda localidad con menor presencia de estructuras sedimentarias respecto al resto de las estudiadas en la presente investigación.



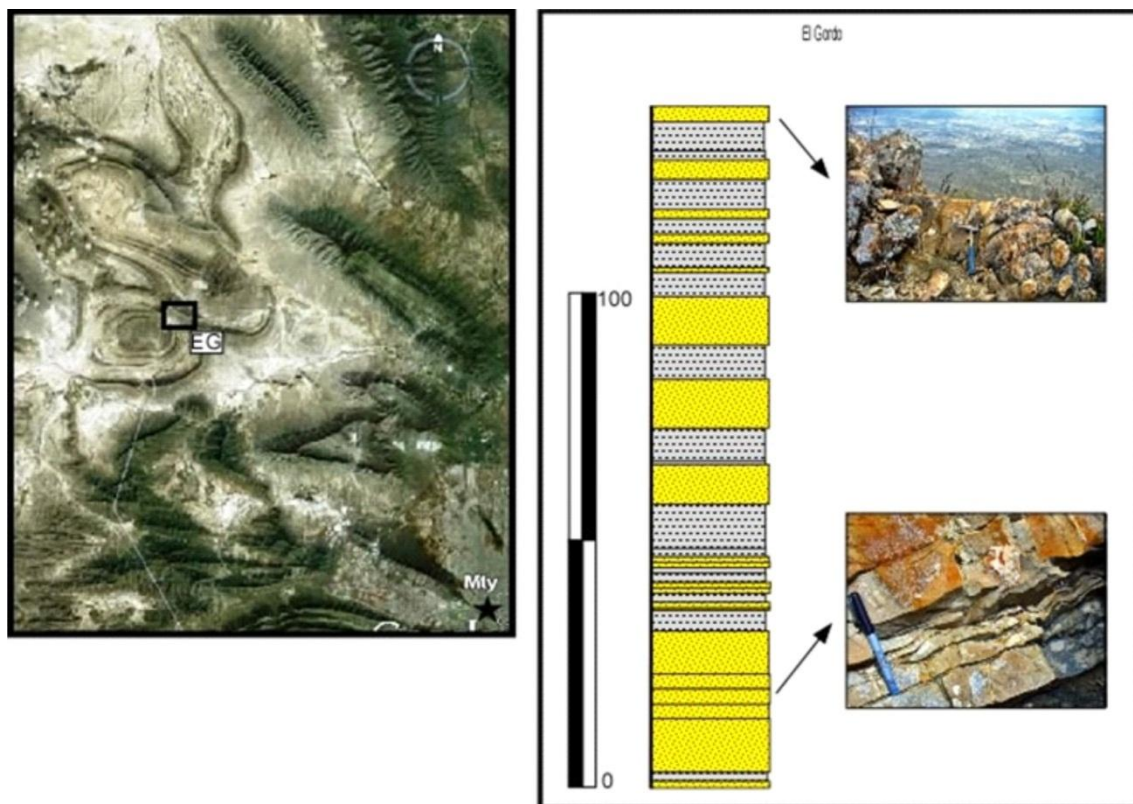
**Fig. 3-4:** Localización y columna estratigráfica del afloramiento Las Presas en la parte oeste de la cuenca.

### 3.1.4 Sección El Gordo (EG)

**Ubicación:** Centro de la cuenca y cercanías del diapiro homónimo.

**Espesor:** 167 metros.

**Descripción:** Areniscas y lutitas de grano medio a grueso con coloración grisácea. Presentan pocas rizaduras sólo en un nivel estratigráfico. Bioturbación escasa y poca presencia de bivalvos, se encuentran también algunos restos de *Sphenodiscus pleurisepta* principalmente en la parte superior.



**Fig. 3-5:** Ubicación y perfil estratigráfico de El Gordo en el centro de la Cuenca de La Popa. En la imagen derecha, de arriba hacia abajo: Contacto entre la Fm. Muerto y la Fm. Potrerillos, rizaduras en la parte inferior de la Fm. Muerto.

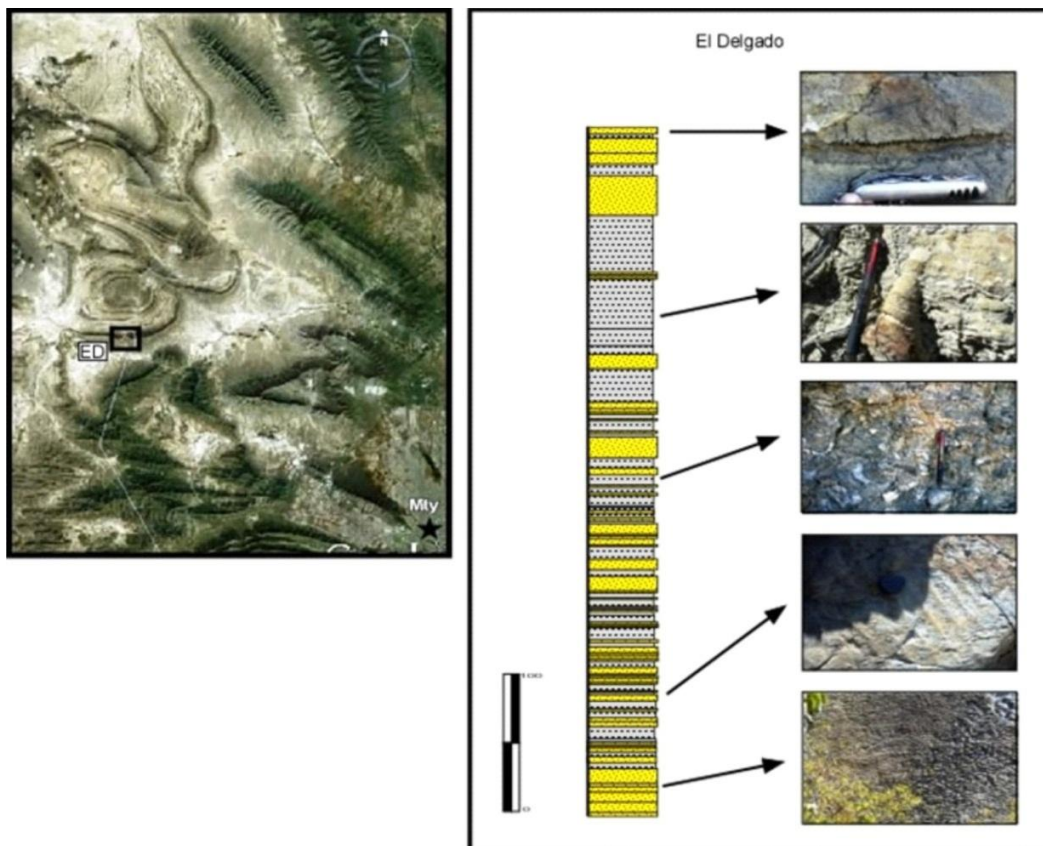


### 3.1.5 Sección El Delgado (ED)

**Ubicación:** Localidad tipo, extremo sur de la cuenca, flanco sur del Sinclinal Delgado.

**Espesor:** 495 metros.

**Descripción:** Areniscas, lutitas y limolitas de grano fino a medio con coloraciones grisáceas. Presentan laminaciones finas paralelas y cruzadas, rizaduras, así como en espinas de pescado. La bioturbación presente está conformada por madrigueras de los tipos *Ophiomorpha* y *Gyrolites*. En esta localidad es posible notar la presencia de *Sphenodiscus sp.*, bancos de *Exogyra sp.*, entre otros (Fig. 3-6). Esta localidad puede representar un ambiente de depositación más somero.



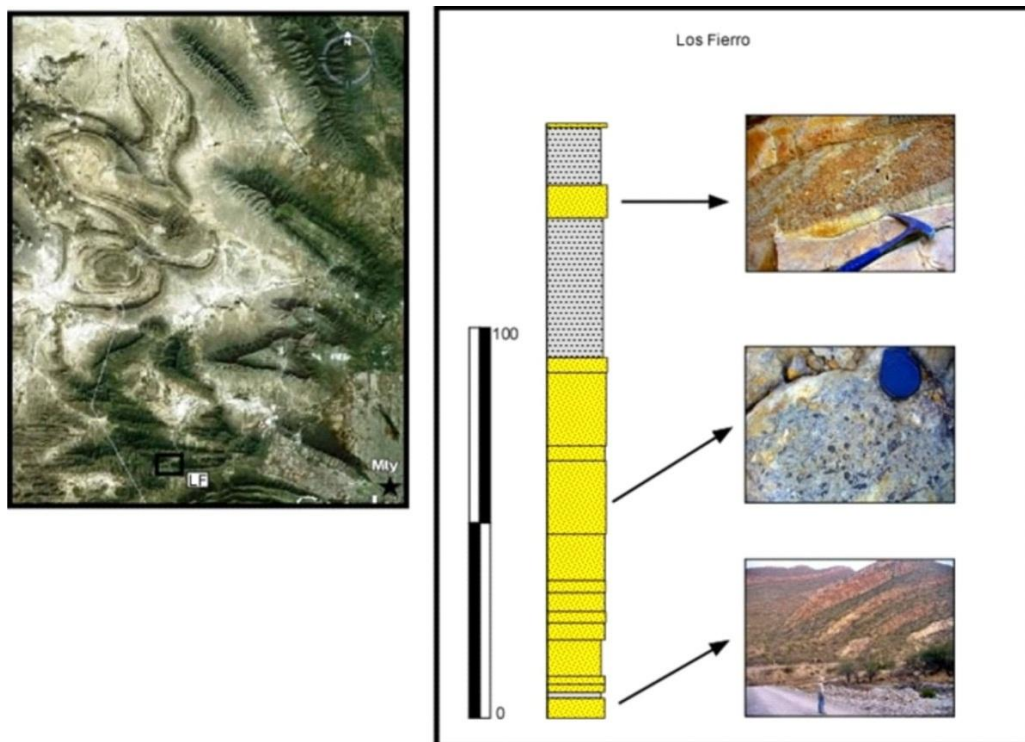
**Fig. 3-6:** Localización geográfica y perfil estratigráfico de El Delgado. En la imagen derecha, de arriba hacia abajo: Bioturbación (*Ophiomorpha*), bioturbación, banco de ostras (*Exogyra costata*) y rizaduras.

### 3.1.6 Sección Los Fierro (LF)

**Ubicación:** Fuera de la cuenca, frente a la Curvatura de Monterrey, lejos de la influencia salina y en las proximidades de la Cuenca de Parras.

**Espesor:** 150.84 metros.

**Descripción:** Areniscas, lutitas y coquinas de coloraciones grisáceas (Fig. 3-7). El tamaño de grano predominante va de medio a grueso. Se puede apreciar la presencia de laminaciones finas, paralelas, cruzadas y en espina de pescado. La presencia de madrigueras del tipo *Ophiomorpha* es bastante notable sobre todo en los niveles superiores. Esta localidad presenta además restos de gasterópodos y bivalvos, etc. Es la segunda localidad con mayor presencia de organismos después de El Delgado.



**Fig. 3-7: Localización geográfica de Los Fierro y perfil estratigráfico. En la imagen derecha, de arriba hacia abajo: Laminación cruzada en banco de gasterópodos, banco de gasterópodos y parte inferior de la Fm. Muerto en la localidad.**

### 3.2 Cambios regionales de la Fm. Muerto

La Fm. Muerto exhibe cambios según su ubicación en la Cuenca de La Popa que indican su ambiente de depositación, las características más notables que presentan cambios a lo largo de la cuenca son el espesor, la bioturbación, la presencia de fósiles, la cantidad del cementante además del tamaño de grano (Fig. 3-8).

Uno de los cambios más significativos es la poca presencia de bioturbación en las localidades influenciadas por estructuras salinas (Boca de Potrerillos y El Gordo). Por el contrario, la cantidad de presencia fósil aumenta hacia el sur de la cuenca. Además, las estructuras sedimentarias, como los diferentes tipos de laminación, aumentan hacia el este de la cuenca.

La bioturbación aumenta en los bordes de la cuenca, específicamente del margen norte (Microondas) hacia el margen sur (El Delgado) para llegar a un número importante en los estratos superiores de la Fm. Muerto en la localidad Los Fierro (LF) fuera de la cuenca, cercana a la Curvatura de Monterrey en donde se detectaron grandes bancos de *Ophiomorpha* (Los Fierro).

Los diferentes tipos de laminación, tanto paralela, cruzada y en espina de pescado, se concentran mayoritariamente, en los bordes norte y sur de la cuenca, además del sur de la misma cercana a la curvatura. Lo anterior hace suponer que son estas localidades las de ambiente más somero.

Por otro lado, las rizaduras aumentan también desde el Este (Boca de Potrerillos) y desde el Sur (Los Fierro) en dirección al borde sur del Sinclinal Delgado (El Delgado).

Además, la presencia de la ostra *Exogyra Costata* aumenta en dirección W-SE desde Las Presas hacia El Delgado.

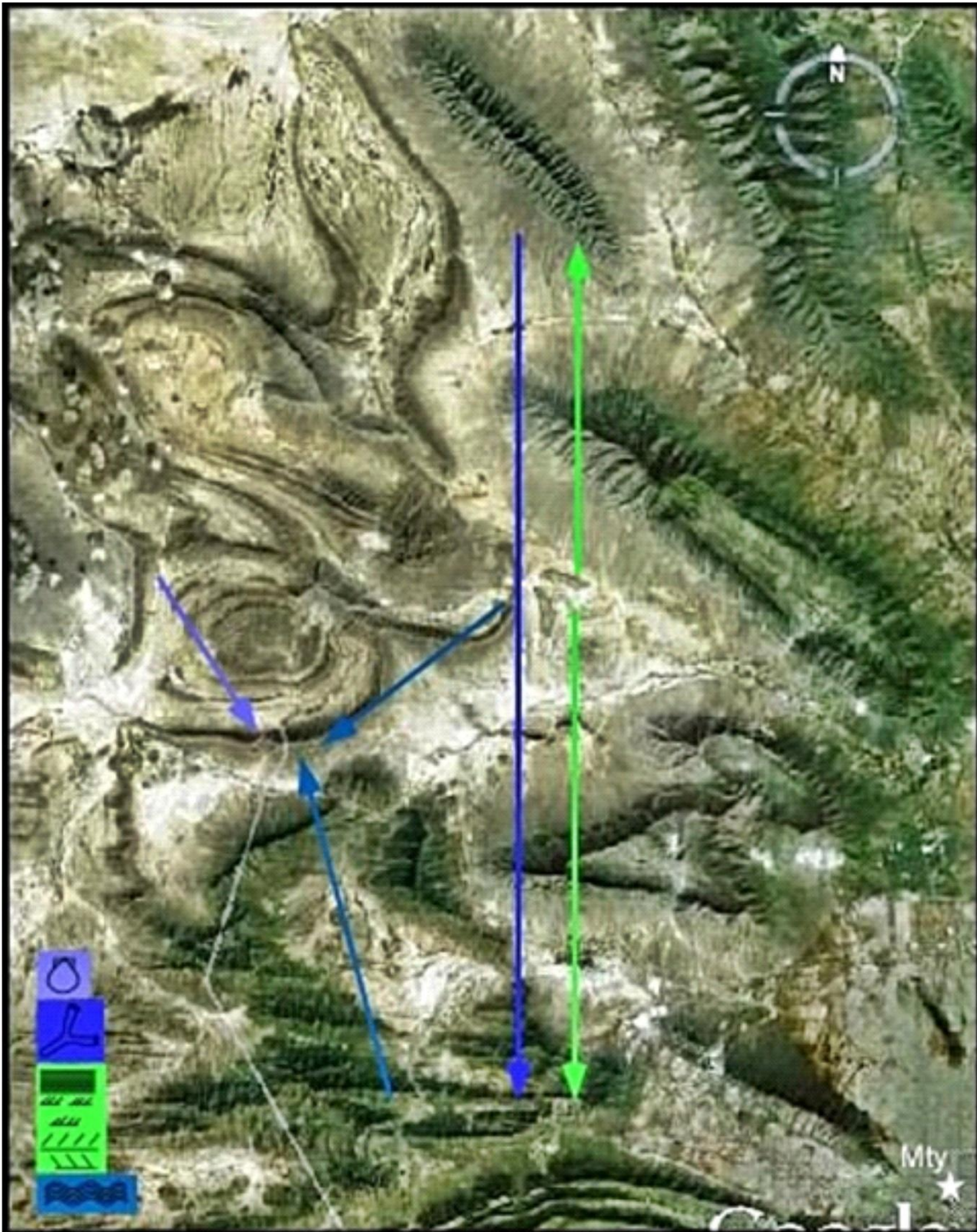


Fig. 3-8: Cambios regionales de la Fm. Muerto en la Cuenca de La Popa y cerca de la Curvatura de Monterrey (Fotografía satelital: Google Earth, 2011).

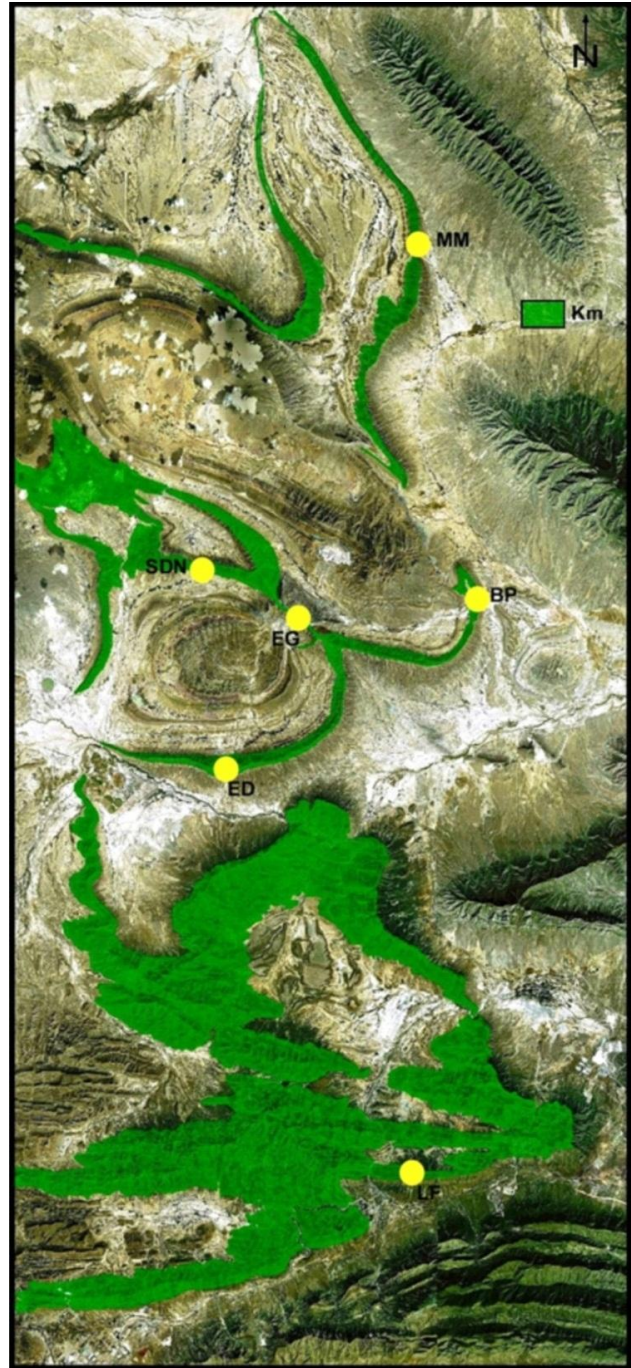
### 3.3 Espesores de la Fm. Muerto

La Fm. Muerto exhibe cambios en espesor a lo largo y ancho de la Cuenca de La Popa e incluso fuera de ella (Fig. 3-9). La localidad Microondas (MM), en el extremo norte de la cuenca, presenta un espesor de aproximadamente 25 metros, constituyendo una de las localidades en donde el espesor es más delgado.

Hacia el Sureste a 23 km, el espesor en Boca de Potrerillos (BP) se adelgaza a 8 metros siendo ésta la localidad con el menor espesor de dicha Formación.

Por otro lado, a 25 km hacia el suroeste de Microondas, en el flanco norte del Sinclinal Delgado (SDN) el espesor de la Fm. Muerto alcanza los 292 metros.

En el centro de la cuenca, la Fm. Muerto cruza la vecindad del diapiro El Gordo en donde su espesor disminuye desde 292 m al norte del Sinclinal Delgado hasta 167 m (EG) y de ahí vuelve a aumentar hasta 457 m en el flanco sur del sinclinal donde se ubica su localidad tipo (ED).



**Fig. 3-9:** Localidades en donde se midió el espesor de la Fm. Muerto (Base del mapa: imagen satelital de Google Earth, 2011.)

Por último, a 28 km al Sureste del flanco sur del Sinclinal Delgado, en la localidad Los Fierro (LF), la localidad más sureña de las estudiadas, la Fm. Muerto alcanzó los 196 metros de espesor.

## 4 Petrografía

### 4.1 Introducción

Los sedimentos se componen de granos derivados de rocas preexistentes que se liberan a través del intemperismo mecánico y químico, posteriormente son transportados hasta el sitio deposicional por una gran variedad de mecanismos como el viento, los glaciares, las corrientes fluviales, las olas, las mareas, además de los flujos de detritos y las corrientes turbidíticas. En un sentido amplio, la composición de los sedimentos siliciclásticos es un reflejo de los procesos de intemperismo determinados ampliamente por el clima y la geología del área fuente (la procedencia del sedimento). Además la composición del sedimento también es afectada por la distancia del transporte así como por los procesos diagenéticos (Tucker, 2005).

Con la finalidad de conocer mejor la composición mineralógica de la Fm. Muerto, se realizaron análisis petrográficos que nos conducirán a la determinación del o las áreas fuente de la misma. Se analizaron 55 muestras recolectadas en seis localidades, cinco en la Cuenca de La Popa y una fuera de la misma en las inmediaciones de la Cuenca de Parras.

Por otro lado, el método más frecuentemente utilizado para determinar cuantitativamente la composición de los granos de arena, lo constituye el conteo de éstos bajo el microscopio (Sánchez-Zavala & Centeno-García, 2005). El método utilizado en el presente estudio fue el Gazzi–Dickinson, que consiste en clasificar a las partículas de tamaño de arena que se encuentran dentro de un fragmento de roca como partículas monocristalinas.

### 4.2 Las areniscas en los análisis de procedencia

Las areniscas con frecuencia contienen pistas significativas sobre su origen, entre las cuales se encuentran la selección, la forma del grano, así como la composición de los mismos (Tarbuck & Lutgens, 2000).

Específicamente el relieve y el clima del área fuente se pueden inferir por la redondez de los granos y por el grado promedio de la alteración de los feldespatos (Folk, 1980). Por otra parte, el marco tectónico se puede determinar por la proporción relativa del cuarzo, de los feldespatos y los fragmentos líticos (Dickinson, 1985). Por último, la historia del transporte de una arenisca se puede inferir mediante el análisis de la redondez y esfericidad de los granos, así como por la madurez textural y mineralógica (Pettijohn et al., 1987).

Estas rocas son utilizadas frecuentemente en los estudios de procedencia, debido a que se forman como partículas sólidas que son desprendidas de la roca madre, pero a la vez son lo suficientemente pequeñas como para poder observar una muestra considerable de granos en una sola lámina delgada. Su ventaja es que conservan la composición así como la textura original cuando se encuentran formadas por fragmentos líticos, y a pesar del transporte y de los procesos diagenéticos, dichos sedimentos se encuentran casi inalterados conservando información acerca de su roca madre. Por otro lado, las características texturales de las arenas, tales como la forma y el tamaño de grano, permiten determinar la madurez del sedimento original (Sánchez-Zavala & Centeno-García, 2005).

El término procedencia ha sido utilizado por los petrógrafos sedimentarios para clasificar los factores relacionados a la producción de un sedimento o roca sedimentaria.

Los aspectos más importantes en un estudio de procedencia son:

- La identificación del área fuente, el relieve y el clima de la misma.
- El marco tectónico.
- La historia del transporte.
- Las modificaciones diagenéticas.



### 4.3 Principales constituyentes de las areniscas

Las areniscas, así como los conglomerados y las brechas, consisten de granos detríticos, los cuales forman el marco de los sedimentos, una matriz de grano fino entre los granos, minerales autigénicos, así como un cemento precipitado después de la depositación del sedimento durante la diagénesis. Prácticamente cualquiera de los minerales que ocurren de manera natural y los fragmentos de cualquier tipo de roca conocida pueden presentarse como granos en un sedimento clástico. Asimismo, ciertos minerales y tipos de roca son más estables que otros bajo las condiciones sedimentarias, por lo que la cantidad de los tipos de granos comunes es relativamente pequeña (Tucker, 2005).

La abundancia de un mineral en particular en una roca sedimentaria depende de varios factores como (Tucker, 2005):

- Su disponibilidad en el área fuente.
- Su estabilidad tanto mecánica como química.
- Su resistencia al intemperismo y a la alteración.

Las partículas detríticas en las rocas siliciclásticas se pueden dividir en seis categorías:

- Cuarzo
- Feldespatos
- Fragmentos de roca
- Mica y arcillas
- Otros constituyentes

### 4.3.1 Cuarzo

Debido a su durabilidad, el cuarzo es el mineral predominante en la mayoría de las areniscas debido a que es el más estable bajo las condiciones sedimentarias; por lo que, en promedio, la mayoría de las areniscas poseen al menos 65% de contenido de este mineral; mientras que, algunas pueden llegar hasta el 100% (Tarbuck & Lutgens, 2000; Tucker, 2005). La mayoría de los granos de este mineral son derivados de rocas plutónicas y metamórficas como gneisses y esquistos (Tucker, 2005).

Los tipos de cuarzo que fueron tomados en cuenta en el presente estudio fueron los siguientes:

- Cuarzo monocristalino ondulado (Qmu)
- Cuarzo monocristalino no ondulado (Qmn)
- Cuarzo policristalino mayor a tres cristales ( $Q_p > 3$ )
- Cuarzo policristalino menor o igual a tres cristales ( $Q_p \leq 3$ )



Fig. 4-1: Tipos de crecimientos de cuarzos, utilizados para diferenciar los orígenes de este mineral (Folk, 1974).

### 4.3.2 Feldespatos

El contenido promedio de feldespatos en una arenisca comprende de 10% al 15%, pero en el caso de las arcosas, comúnmente alcanza el 50%. La estabilidad mecánica de estos minerales es más baja que la del cuarzo debido que son más suaves y su clivaje es más fuerte, lo que conduce a la desintegración de los cristales durante el transporte y los ambientes turbulentos. Por lo anterior, en un sentido amplio, los sedimentos fluviales contienen más feldespato que los marinos someros, los de bahía y los de ambiente eólico (Tucker, 2005).

Los feldespatos más comunes en las areniscas son:

- Plagioclasa (Plg)
- Ortoclasa (Ort)

Son un grupo de minerales débiles y menos estables que pueden formarse bajo un amplio rango de ambientes y temperaturas (Tarbuck & Lutgens, 2000), además pueden presentar una destrucción gradual en las areniscas como producto de una meteorización sustancial así como de un transporte prolongado, los cuales pueden ser reemplazados por el mineral arcilloso sericita (Tarbuck & Lutgens, 2000).

Por otro lado, el contenido de feldespatos de un sedimento está controlado ampliamente por la tasa de erosión y por el clima. Un clima húmedo en el área fuente provoca la destrucción de estos minerales debido a la predominancia del intemperismo químico; mientras que, en un ambiente árido los feldespatos frescos sobreviven al intemperismo físico dominante. La erosión rápida, como sucede en un área con alto relieve, producirá algunos granos feldespáticos a pesar de un clima húmedo (Tucker, 2005).

Por otra parte, los cristales de feldespato son derivados de los mismos tipos de rocas que el cuarzo, principalmente granitos y gneises en donde la ortoclasa predomina sobre la plagioclasa (Tucker, 2005). En el caso de la Fm. Muerto, la sericita es el mineral arcilloso que reemplaza a los feldespatos.

### **4.3.3 Fragmentos líticos**

Un fragmento de roca se vuelve cada vez más pequeño conforme se rompe en sus constituyentes granos y minerales. La composición de los fragmentos de rocas depende básicamente de la geología de la roca fuente así como de la durabilidad de las partículas durante su transporte (Tucker, 2005).

En las areniscas, los fragmentos líticos son comúnmente los siguientes:

- Rocas sedimentarias de grano fino (Ls) tales como lutita y limolita.
- Rocas metamórficas (metasedimentarias) como pizarras, pelitas y micaesquistos (Lm).
- Rocas sedimentarias silicatadas como el pedernal, usualmente clasificado como cuarzo policristalino (Qp).
- Rocas ígneas, volcánicas en particular (Lv).

Los fragmentos líticos generalmente son derivados desde rocas supracorticales que han recibido levantamiento rápido y erosión. Así que, los cinturones montañosos y áreas volcánicas aportan grandes cantidades, mientras que el basamento granítico/continental no lo hace. Por lo tanto, los tipos de fragmentos líticos correlacionan el marco de tectónica de placas del terreno fuente con la cuenca sedimentaria adyacente (Tucker, 2005).

#### 4.3.4 Accesorios

Otros componentes detríticos pueden ser las micas, los fragmentos de conchas así como los minerales pesados. En el caso de la Fm. Muerto, los accesorios más comunes son los fragmentos de conchas, seguidos por las micas.

Los accesorios también pueden proporcionar algunas pistas sobre su origen, por ejemplo, las micas como la biotita y la moscovita se derivan de diversas rocas ígneas como los esquistos metamórficos y las filitas (Tucker, 2005).

Por último, los fósiles proporcionan información sobre el ambiente en el cual se depositó el sedimento arenoso para formar la roca.

**Tabla 4-1: Parámetros para los diagramas QFL**

Parámetros para los diagramas QFL							
Clave	Q%	F%	L%	Q total	F total	L total	QFL total
Microondas							
MM01	46	3	13	138	9	39	299
MM02	60	3.6	12.3	181	11	37	292
MM03	47.3	3.6	8	142	11	24	291
MM04	62.6	4	9.6	188	12	29	299
MM05	16	0.6	6.6	48	2	20	323
MM06	18	0	2.6	54	0	8	299
MM07	15	0.3	5	45	1	15	303
MM08	20.6	0.3	1.3	62	1	40	302
MM09	20	0	5.6	60	0	17	303
MM10	52.6	1	1.3	158	3	40	300
Boca de Potrerillos							
BP01	22	0.33	4	66	1	12	295
BP02	26	1	7.3	78	3	22	299
BP03	48	1.6	16.3	144	5	49	301
BP04	29.3	0	7	88	0	21	310
BP05	53.6	1.6	18.6	161	5	56	301
BP06	33	1.3	7	99	4	21	300
BP07	29.6	1.3	7.6	89	4	23	300
BP08	27	0.6	11.3	84	2	35	299
BP09	8.3	1	1.6	25	3	5	295

Parámetros para los diagramas QFL							
Clave	Q%	F%	L%	Q total	F total	L total	QFL total
BP10	27.6	1.3	11.6	83	4	35	286
Las Presas Norte							
LP01	40.3	1.3	20.3	121	4	61	298
LP02	35	0.3	14.6	105	1	44	292
LP03	28.3	4.6	22	85	4	66	301
LP04	67	0	11	201	0	33	395
LP05	42	2.3	18	126	7	54	293
Las Presas Sur							
LP06	51	2	15.6	153	6	47	301
LP07	32	0.6	8.3	96	2	25	289
LP08	33	1.6	5.3	99	5	16	295
LP09	13.3	0	4.3	40	0	13	299
LP10	40.6	4	17.6	122	12	53	295
El Gordo							
EG01	60.3	1.3	16	181	4	48	292
EG02	56.6	1	16.3	170	3	49	288
EG03	53.3	2	19.3	160	6	58	312
EG04	60.6	1.3	15	182	4	45	304
EG05	40.6	2	13.3	122	6	40	302
EG06	45.3	0.6	15.6	136	2	47	193
EG07	37.6	0.3	18.3	113	1	55	299
El Delgado							
ED02	38.3	0.6	16.6	115	2	50	290
ED03	51	1.6	11.6	153	5	35	298
ED04	40.6	2.3	13.6	122	7	41	284
ED05	24.3	2.3	12	73	7	36	291
ED06	6	0.6	6.6	18	2	20	244
Los Fierro							
LF01	4.3	0.3	1.3	13	1	4	289
LF02	33.6	1	3.6	101	3	11	299
LF03	19.6	0.6	7	59	2	21	286
LF04	51	1	16.66	153	3	50	294
LF05	22	0.3	6	66	1	18	292
LF06	53.3	0.6	11.6	169	2	35	292
LF07	50.6	2.6	19.33	152	8	58	293
LF08	49.3	3	17.3	148	9	52	295
LF09	49	3	14.3	147	9	43	300
LF10	43.6	3	11	131	9	33	284

Tabla 4-2: Parámetros Qm y Qp

Parámetros de Qm y Qp						
Clave	Qm %	Qm total	Qp > 3	Qp <= 3	Qp total	Qp %
Microondas Mariposa						
MM01	44	132	5	1	6	2
MM02	59	178	2	1	3	1
MM03	46	138	1	3	4	1
MM04	59	178	5	5	10	3
MM05	14	42	2	4	6	2
MM06	16	49	2	3	5	1
MM07	13	40	2	3	5	1
MM08	20	61	4	1	5	1
MM09	19	59	0	1	1	0.3
MM10	49	148	7	3	10	3
Boca de Potrerillos						
BP01	21	65	0	1	1	0.3
BP02	25	77	1	0	1	0
BP03	40	120	20	4	24	8
BP04	27	83	0	5	5	1.6
BP05	49	148	7	6	13	4
BP06	31	93	5	1	6	2
BP07	29	87	2	0	2	0.6
BP08	25	76	3	5	8	2.6
BP09	8	25	0	0	0	0
BP10	26	79	1	3	4	1.3
Las Presas						
LP01	37	111	7	3	10	3.3
LP02	30	90	11	4	15	5
LP03	20	61	19	5	24	8
LP04	65	197	2	2	4	1.3
LP05	36	108	10	8	18	6
LP06	46	139	9	5	14	4.6
LP07	30	90	3	3	6	2
LP08	28	85	11	3	14	4.6
LP09	12	38	1	1	2	0.6
LP10	38	115	7	0	7	2.3
El Gordo						
EG01	59	177	2	2	4	1.3
EG02	44	134	36	0	36	12
EG03	50	152	8	0	8	2.6
EG04	60	180	0	2	2	0.6
EG05	38	116	4	2	6	2
EG06	42	128	5	3	8	2.6
EG07	31	95	17	1	18	6
EG08	47	142	0	1	1	0.3
El Delgado						
ED01	44	132	7	4	11	3.6
ED02	34	104	7	4	11	3.6
ED03	47	143	7	3	10	3.3
ED04	38	115	2	5	7	2.3
ED05	23	69	2	2	4	1.3
ED06	4	13	3	2	5	1.6

Parámetros de Qm y Qp						
Clave	Qm %	Qm total	Qp > 3	Qp ≤ 3	Qp total	Qp %
ED07	34	104	7	4	11	3.6
Los Fierro						
LF01	3	11	0	2	2	0.6
LF02	32	97	4	0	4	1.3
LF03	16	48	4	7	11	3.6
LF04	49	148	2	3	5	1.6
LF05	21	63	1	2	3	1
LF06	54	162	3	4	7	2.3
LF07	48	144	6	2	8	2.6
LF08	46	138	4	6	10	3.3
LF09	46	138	5	4	9	3
LF10	43	129	2	0	2	0.6

Tabla 4-3: Litoclastos contados

Litoclastos contados						
Clave	Ls %	Lv %	Lm %	Ls total	Lv total	Lm total
Microondas Mariposa						
MM01	6	6.3	0.6	18	19	2
MM02	12.3	0	0	37	0	0
MM03	5.6	2.3	0	17	7	0
MM04	7	2.3	0.3	21	7	1
MM05	6.6	0	0	20	0	0
MM06	2.6	0	0	8	0	0
MM07	5	0	0	15	0	0
MM08	11.3	2	0	34	6	0
MM09	5.6	0	0	17	0	0
MM10	9.3	2.6	0	28	8	4
Boca de Potrerillos						
BP01	3.6	0.3	0	11	1	0
BP02	7	0.3	0	21	1	0
BP03	11	5	0.3	33	15	1
BP04	7	0	0	21	0	0
BP05	16	2.6	0	48	8	0
BP06	7	0	0	21	0	0
BP07	7	0.6	0	21	2	0
BP08	10.6	1	0	33	3	0
BP09	1.3	0.3	0	4	1	0
BP10	10.6	1	0	32	3	0
Las Presas						
LP01	14.3	4	2	43	12	6
LP02	12.3	1	1.3	37	3	4
LP03	18	4	0	54	12	0
LP04	10	0.3	0.6	30	1	2
LP05	17.6	0.3	0	53	1	0
LP06	14	1.3	0.3	42	4	1
LP07	8.3	0	0	25	0	0



Litoclastos contados						
Clave	Ls %	Lv %	Lm %	Ls total	Lv total	Lm total
LP08	5	0	0.3	15	0	1
LP09	3.6	0.3	0.3	11	1	1
LP10	11.3	5.3	1	34	16	3
El Gordo						
EG01	12.3	3.6	0	37	11	0
EG02	11.3	3.3	1.6	34	10	5
EG03	17.6	1	0.6	53	3	2
EG04	11.6	0	3.3	35	0	10
EG05	13.3	0	0	40	0	0
EG06	15	0.6	0	45	2	0
EG07	15.3	1.6	1.3	46	5	4
EG08	10	0	0	30	0	0
El Delgado						
ED01	12.3	0	2.3	37	0	7
ED02	11.3	3.3	2	34	10	6
ED03	10.6	0.3	0.6	32	1	2
ED04	9.6	3.6	0.3	29	11	1
ED05	11.3	0.6	0	34	2	0
ED06	5	1.3	0.3	15	4	1
ED07	11.3	3.3	2	34	10	6
Los Fierro						
LF01	1	0.3	0	3	1	0
LF02	2.3	1.3	0	7	4	0
LF03	6.3	0.3	0.3	19	1	1
LF04	14.3	2	0.3	43	6	1
LF05	5.6	0	0.3	17	0	1
LF06	9.3	2.3	0	28	7	0
LF07	16	2.3	1	48	7	3
LF08	15.3	1.3	0.6	46	4	2
LF09	11.6	1.3	1.3	35	4	4
LF10	8.3	1.6	1	25	5	3

**Tabla 4-4: Parámetros Cemento, Matriz, Accesorios y Fósiles**

Parámetros C,M,A y F				
Clave	C %	M%	A %	F %
Microondas Mariposa				
MM01	36.3	0	1.3	0
MM02	20.6	0	0.3	0
MM03	36.6	0	1.3	0
MM04	21	0	2.3	0
MM05	83.6	0	0.6	0
MM06	78.3	0	0.3	0.3
MM07	76	0	1	3.6
MM08	63.6	0	1	0.3
MM09	71.3	1.3	1	1.6
MM10	31.6	0	1.3	0

Parámetros C,M,A y F				
Clave	C %	M%	A %	F %
Boca de Potrerillos				
BP01	71.3	0	0.6	0
BP02	63.6	0	1.6	0
BP03	33	0	1.3	0
BP04	67	0	0	0
BP05	25.6	0	0.6	0
BP06	58.6	0	0	0
BP07	59.6	0	1.6	0
BP08	58.3	0.3	0.6	0
BP09	68.3	0	0.6	18.3
BP10	53.3	0.6	0.3	0.3
Las Presas				
LP01	36	0	0.6	0.6
LP02	46	0	1.3	0
LP03	47.3	0	0.6	0.6
LP04	53.3	0	0.3	0
LP05	33.6	1.3	0.3	0
LP06	31.6	0	0	0
LP07	54.3	0	0.6	0.3
LP08	57.6	0	0.6	0
LP09	79.6	0	2.3	0
LP10	35.3	0	0.6	0
El Gordo				
EG01	19.3	0	0.3	0
EG02	22	0	0	0
EG03	29	0.3	0	0
EG04	24	0	0.3	0
EG05	44	0	0.6	0
EG06	2.6	0	0	0
EG07	43	0	0	0
EG08	42	0	1.3	0
El Delgado				
ED01	32.6	0	1.6	2.6
ED02	40.3	0	0.3	0.3
ED03	34.3	0	0.6	0
ED04	37	0	1	0
ED05	58	0	0.3	0
ED06	52.3	0	1.6	14
ED07	40.3	0	0.3	0.3
Los Fierro				
LF01	61.3	0	0	29
LF02	61.3	0	0	0
LF03	66	0.6	0.3	1
LF04	28	0	1.3	0
LF05	68	0	0.3	0.6
LF06	28.6	0	0	0
LF07	24	0	0.6	0.3
LF08	27	0.3	1.3	0
LF09	32.3	0	1.3	0
LF10	37	0	0	0

---

## 4.4 Petrofacies

### 4.4.1 Sección Microondas

Esta localidad presenta areniscas submaduras de clasificación moderada con granos subangulosos, que además muestran todos los tamaños de grano (Fig. 4-2). Predominan los cuarzos monocristalinos subangulosos de tipo volcánico, también se observa la presencia de cuarzo plutónico y de tipo metamórfico elongado con una relación de  $Q_{m94.9} Q_{p>332.77} Q_{p<-32.31}$ .

Los feldespatos, en su gran mayoría subangulosos, son plagioclasas principalmente con una relación de  $Pl_{88.09} Ort_{11.90}$ , algunos de ellos alterados a sericita.

Los fragmentos líticos son comunes, siendo estos los segundos en proporción solamente superados por el cuarzo, predominan los líticos sedimentarios, seguidos de los de tipo volcánico con una relación de  $L_{S79.92} L_{V17.47} L_{m2.60}$ . Los contactos entre los granos son suturados principalmente y algunos puntuales. Son comunes, también, los fragmentos de ostras y gasterópodos. Además, algunas de las muestras presentan un poco de oxidación además de estar compuestas por cemento calcáreo en su mayoría. Estas petrofacies presentan una composición promedio de  $Q_{23} F_{1.6} L_{8.66}$ .

Lo anterior sugiere una arenisca formada en un ambiente de energía moderada cuya fuente se determina como de tipo volcánico con aportación sedimentaria principalmente. Por otra parte, el tipo de roca predominante en esta localidad está representado por sublitarenitas según el diagrama de Folk, 1980.

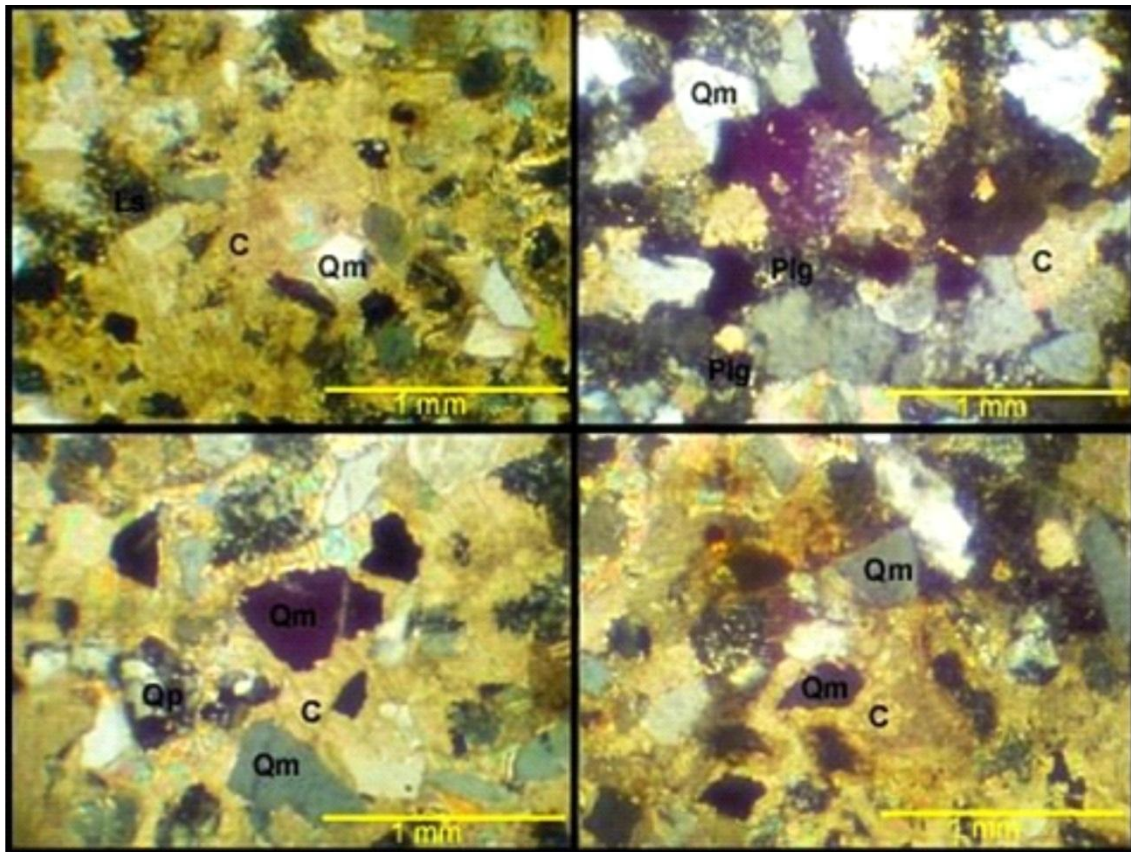


Fig. 4-2: Muestra de las petrofacies de la localidad Microondas bajo microscopio.

#### 4.4.2 Sección Boca de Potrerillos

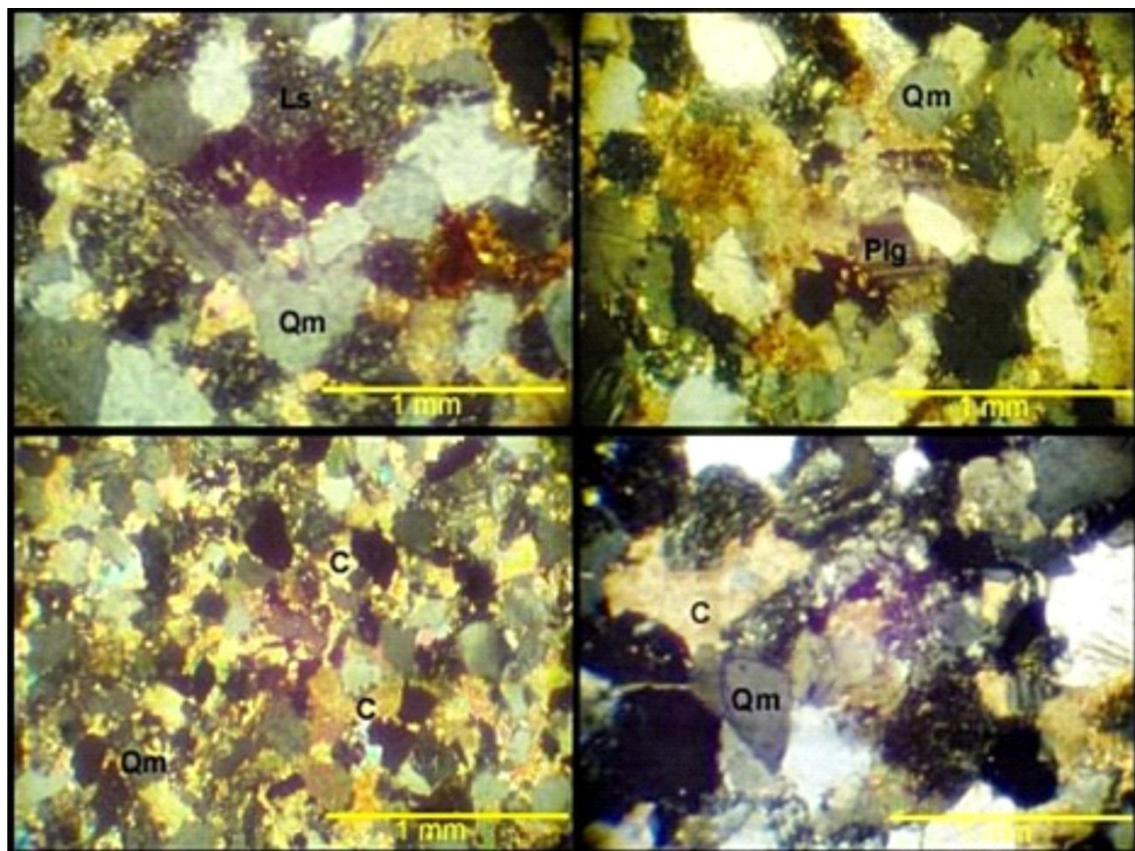
Las petrofacies de esta sección presentan granos que van desde subangulosos hasta subredondeados, la clasificación va de pobre, pasando por buena hasta moderada y el tamaño de grano varía desde fino hasta muy grueso con contactos suturados y puntuales entre los granos (Fig. 4-3). Los cuarzoes de forma subangulosa son principalmente monocristalinos de tipo plutónico con una proporción de  $Qm_{92.59}Qp_{>34.58}Qp_{<-3.2.82}$ .

Los feldespatos presentes son plagioclasas principalmente y subangulosas con una relación con las ortoclasas de  $Plg_{96.77}Ort_{3.22}$ .

Los fragmentos de roca presentes son principalmente de tipo sedimentario seguidos por los de tipo volcánico y subangulosos con una relación de  $LS_{87.45}LV_{12.18}Lm_{0.35}$ .

Además presentan oxidación, vetillas de Fe en algunas muestras, así como fragmentos de ostras. Por otra parte, el cemento calcáreo es bastante abundante constituyendo una gran proporción en el contenido de algunas de las muestras.

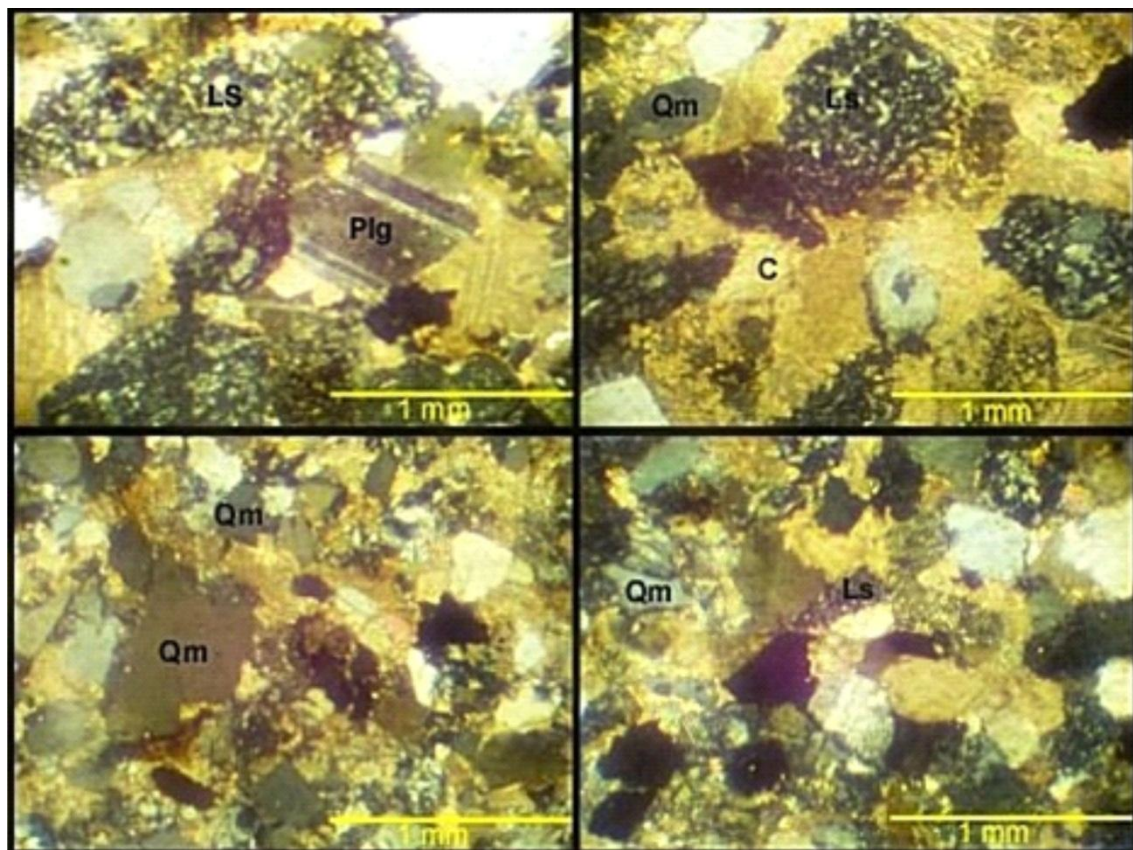
Estas petrofacies presentan una composición promedio de  $Q_{31.2}F_{0.66}L_6$  y se sugiere una fuente de tipo volcánico con fuerte aportación sedimentaria. Por otro lado, estas rocas están clasificadas como sublitarenitas en el diagrama ternario de Folk (1980).



**Fig. 4-3: Muestra de las petrofacies de Boca de Potrerillos bajo microscopio.**

### 4.4.3 Sección Las Presas

Estas petrofacies están caracterizadas por areniscas con granos subangulosos en su mayoría, la clasificación va de pobre a moderada, son areniscas submaduras formadas en un ambiente de energía moderada, poseen un tamaño de grano que va de grano fino a grueso, siendo este último el más abundante. El cemento es bastante abundante en estas muestras, existe oxidación además de fragmentos de micas (Fig. 4-4). Los cuarzos son subangulosos y de tipo plutónico, monocristalinos en su mayoría, con una relación de  $Qm_{90.06}Qp_{>36.96}Qp_{<-32.96}$ .



**Fig. 4-4: Muestra de las petrofacies de Las Presas bajo microscopio.**

Los feldespatos son plagioclasas principalmente subangulosas con una relación de  $Plg_{90.24}Ort_{9.75}$ . La composición promedio de las areniscas de esta localidad es de  $Q_{43.33}F_{1.5}L_{17}$ , presentando contactos suturados.

Los fragmentos de roca son sedimentarios principalmente, seguidos por los de tipo volcánico subanguloso en general, con una relación de  $Ls_{91.44}Lv_{12.13}Lm_{4.36}$ . Por otra parte, las muestras pertenecientes a dicha localidad están clasificadas como sublitarenitas mostrando una tendencia hacia el enriquecimiento en cuarzo según el diagrama de Folk, 1980. Se sugiere una fuente de tipo volcánico para esta localidad, con aportación además de una fuente sedimentaria.

#### 4.4.4 Sección El Gordo

Esta localidad se encuentra en las inmediaciones del diapiro El Gordo, aproximadamente en la región central de la Cuenca de La Popa. Sus petrofacies en general presentan granos subangulosos en su mayoría, mientras que también hay algunas muestras que poseen granos subredondeados y angulosos, los contactos son en su mayoría suturados (Fig. 4-5).

Las areniscas de esta localidad muestran una clasificación moderada, van de submaduras a supermaduras generadas en ambientes de energía moderada a muy alta; presentan además fragmentos de ostras, micas, minerales opacos y oxidación. Por otra parte, el cemento en la totalidad de las muestras es de tipo calcáreo.

Los cuarzos son de tipo monocristalino no ondulado de origen plutónico, se encuentran también los de tipo volcánico y metamórfico elongado. La relación entre los diferentes tipos de cuarzo queda como sigue:  $Qm_{93.12}Qp > 3_{35.96}Qp \leq 3_{0.91}$ .

Los feldespatos son principalmente plagioclasas subangulosas alteradas a sericita algunas de ellas, su relación respecto a las ortoclasas es de  $Plg_{92.60}Ort_{3.70}$ . Es frecuente la disolución de este tipo de minerales.

Por otra parte, los fragmentos líticos presentes son de tipo sedimentario principalmente areniscas y calizas, seguidos por los de tipo volcánico con una relación de  $Ls_{86.02}Lv_{8.33}Lm_{5.64}$ . La composición promedio de estas areniscas es de  $Q_{50.24}F_{1.22}L_{15.49}$ .

Finalmente, las muestras de esta localidad se clasifican como sublitarenitas. Se sugiere una fuente de tipo volcánico para esta localidad, aunque algunos de los componentes de estas muestras, principalmente los feldespatos, han sido afectados por la presencia salina.

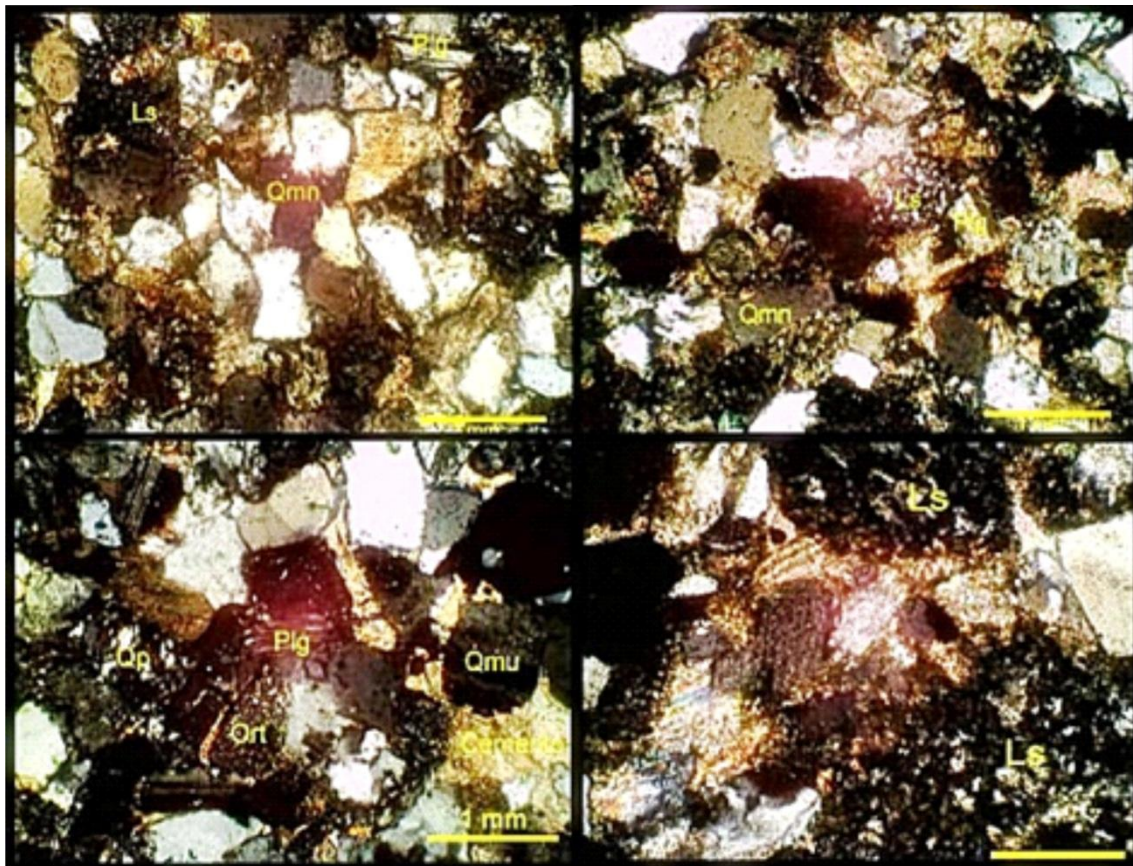


Fig. 4-5: Muestra de las petrofacies de El Gordo bajo microscopio.

#### 4.4.5 Sección El Delgado

La localidad tipo de la Fm. Muerto, ubicada al sur del Sinclinal Delgado, se compone de areniscas que van de submaduras a supermaduras con granos subangulosos con contactos suturados y puntuales predominando los primeros, una clasificación que va de pobre a moderada y que presentan, además, algunos fragmentos de conchas, oxidación, micas además de cemento calcáreo (Fig. 4-6). Los cuarzos de esta localidad son monocristalinos de tipo volcánico y plutónico principalmente, con una relación  $Qm_{92} Qp >_{34.73} Qp \leq_{3.24}$ .



Por otra parte, los feldespatos son plagioclasas principalmente, subangulosas y bien preservadas con una relación respecto a las ortoclasas de  $Plg_{96}Ort_4$ .

Los líticas presentes son de tipo sedimentario la mayoría, de areniscas principalmente y subangulosos. La relación entre los diferentes tipos de fragmentos líticas presentes en las muestras es de  $Ls_{77.89}Lv_{13.76}Lm_{5.64}$ . La composición general promedio de estas petrofacies comprende  $Q_{35.18}F_{18.18}L_{12.42}$ .

Lo anterior sugiere una fuente de tipo volcánico principalmente, con algunas aportaciones de tipo sedimentario. Por otra parte, estas rocas se clasifican como sublitarenitas según el diagrama de Folk (1980).

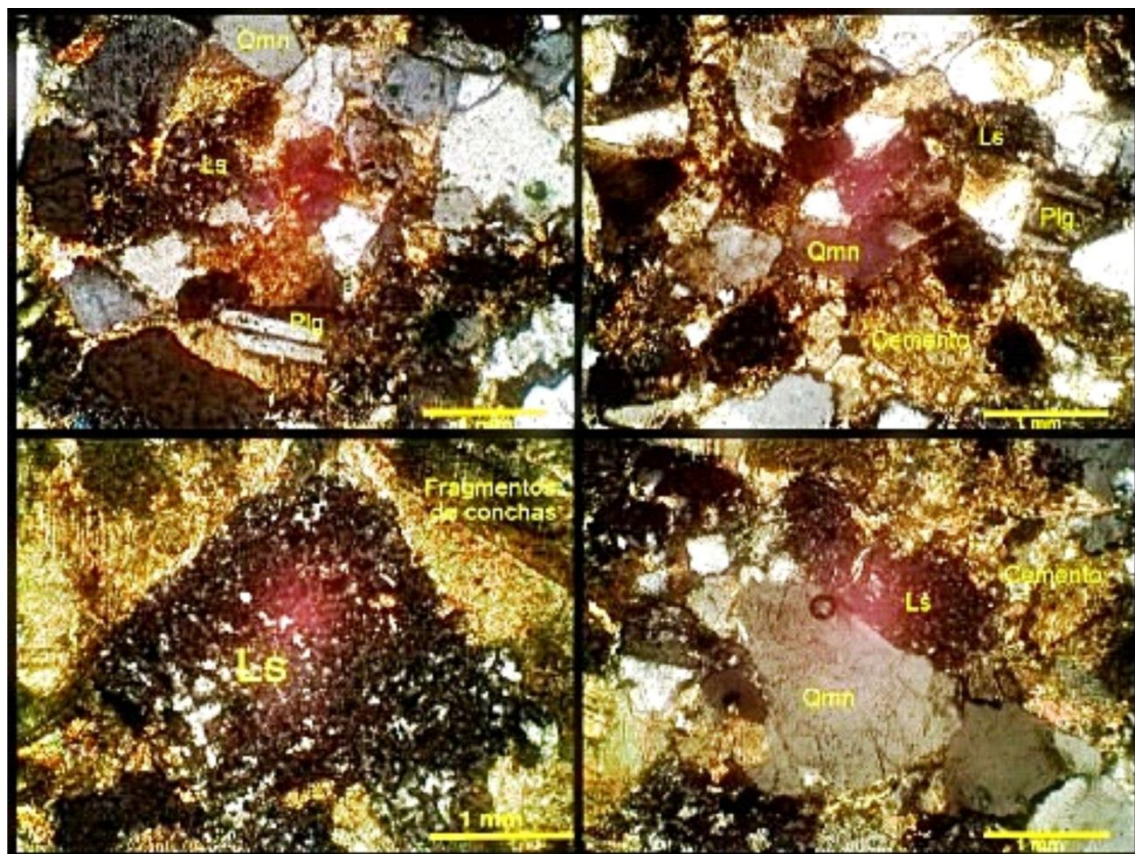


Fig. 4-6: Muestra de las petrofacies de El Delgado bajo microscopio.

#### 4.4.6 Sección Los Fierro

Estas petrofacies se componen principalmente de areniscas con granos subredondeados y subangulosos con contactos de tipo suturado y cóncavo convexos, con clasificación moderada, submaduras en su totalidad, de grano fino a grueso con cemento calcáreo y abundante, además se observa la presencia de fragmentos de ostras. Los cuarzos de esta localidad son de tipo monocristalino no ondulado de tipo plutónico en su mayoría, la relación entre los diferentes tipos de cuarzo es de  $Qm_{94.64}Qp_{>32.72}Qp_{\leq 32.63}$ .

Por otra parte, los feldespatos son plagioclasas principalmente, presentan algo de alteración y su relación respecto a las ortoclasas es de  $Plg_{93.61}Ort_{6.38}$ .

Los fragmentos líticos son mayoritariamente sedimentarios, principalmente de areniscas con una relación respecto a los demás de  $LS_{83.38}LV_{12}Lm_{4.61}$ . La composición promedio es de  $Q_{40.66}F_{2.2}L_8$  y se clasifican, según el diagrama de Folk, 1980, como sublitarenitas (Fig. 4-7). Para esta localidad se sugiere una fuente principal de tipo volcánico con aportaciones sedimentarias.

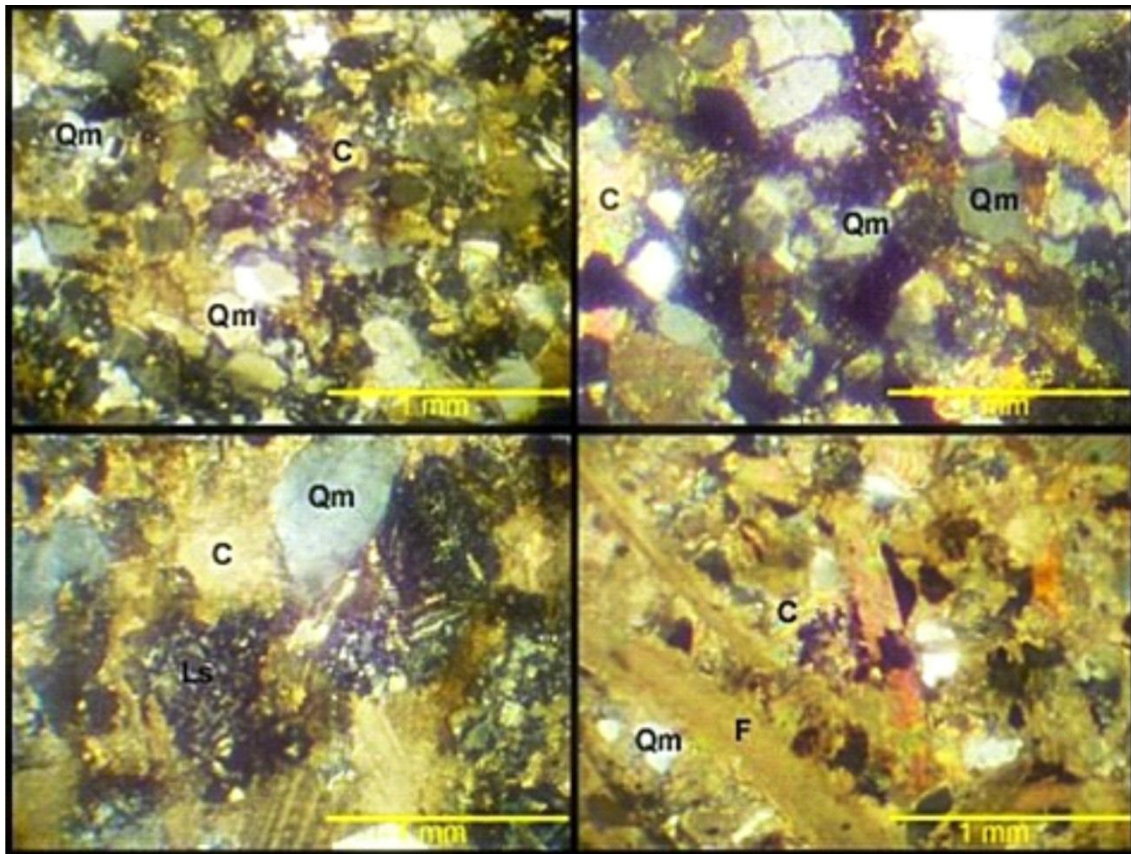


Fig. 4-7: Muestra de las petrofacies de Los Fierro bajo el microscopio.

## 4.5 Resultados

### 4.5.1 Tipo de roca

Se utilizó el diagrama ternario QFL de Folk (1980) para determinar el tipo de roca. Las muestras analizadas en esta investigación se clasificaron como sublitarenitas en su gran mayoría a excepción de una de El Delgado que se clasificó como litarenita propiamente dicha. La tendencia general de las muestras se ubica en el eje Q - L+pedernal dirigiéndose hacia un enriquecimiento en el contenido en cuarzo (Fig. 4-8).

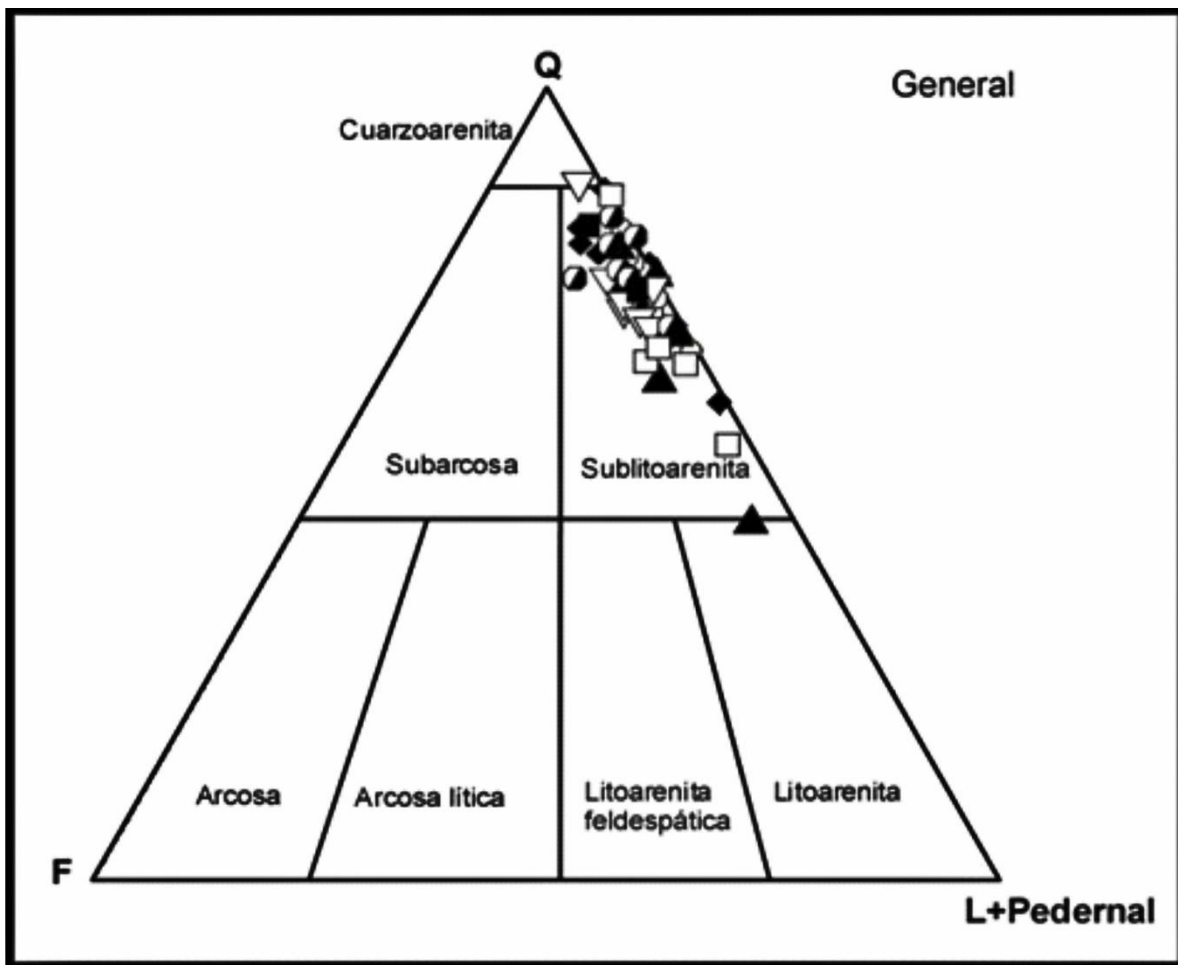
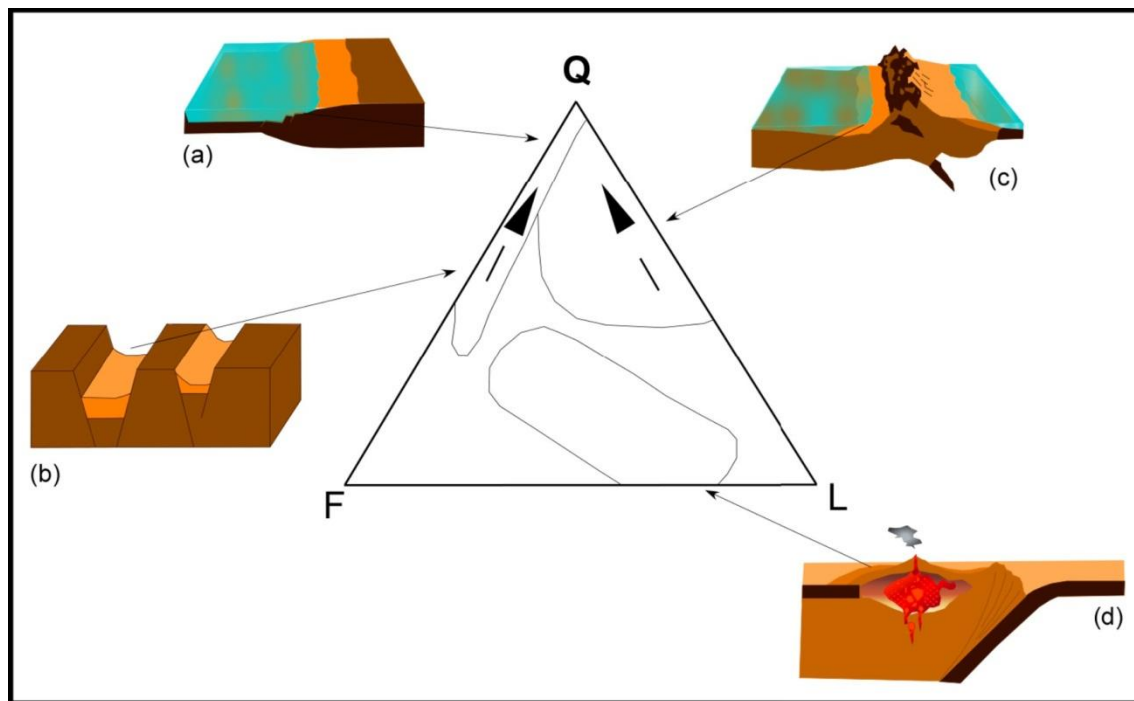


Fig. 4-8: Diagrama ternario de Folk para determinar el tipo de roca (Folk, 1980).

#### 4.5.2 Ambiente tectónico

Para determinar el ambiente tectónico de procedencia se utilizaron los diversos diagramas ternarios QFL de Dickinson (1986; Fig. 4-9). Las muestras se ubican en el campo de los orógenos reciclados para todas las localidades (Fig. 4-10, Fig. 4-11). Las areniscas son cuarzolíticas lo que sugiere que se han depositado en cuencas asociadas a los cinturones de deformación (Dickinson, 1986), y la poca presencia de feldespatos refleja un transporte largo.



**Fig. 4-9: Diagrama ternario QFL para determinar el marco tectónico mediante la proporción relativa del cuarzo, del feldespato, y los fragmentos de roca (Dickinson & Suczek, 1979 modificado por Fitcher & Poche, 1993). (a) Bloques continentales expuestos en un margen pasivo de tipo atlántico, (b) Orógeno reciclado, colisión continental, (c) Bloques continentales expuestos en proceso de ruptura, (d) Arcos magmáticos.**

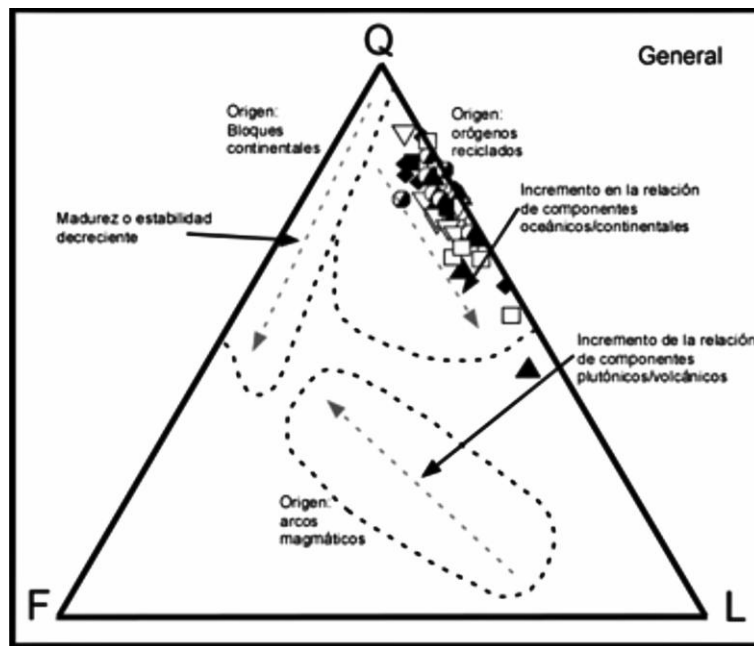


Fig. 4-10: Diagrama ternarios QFL de Dickinson para discriminar ambientes tectónicos (Dickinson & Suczek, 1979).

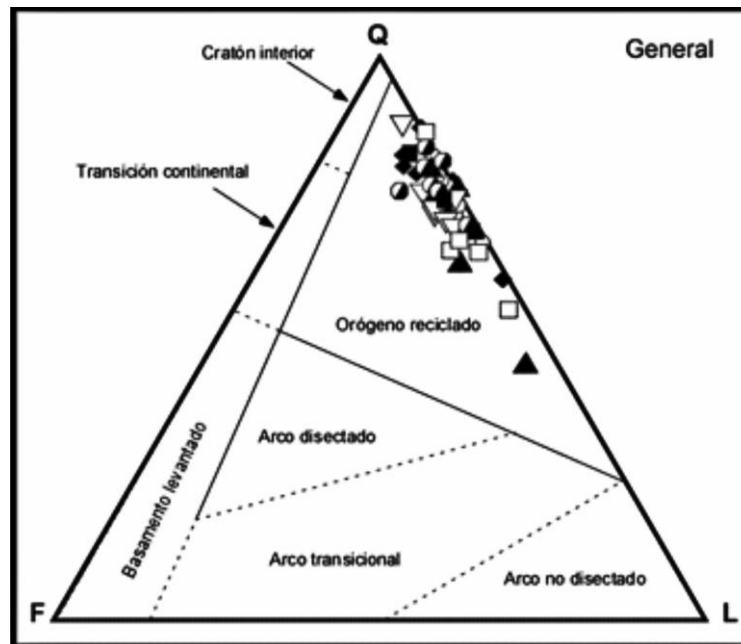


Fig. 4-11: Diagramas ternarios QFL de Dickinson para discriminar ambientes tectónicos (Dickinson, 1983).

Se utilizó también el diagrama ternario QmFL de Dickinson et al. (1983) para determinar el marco tectónico. Las muestras en su mayoría se ubican en los campos de cuarzos reciclado, seguido de cratón interior y transicional reciclado. Dos muestras de la localidad Microondas, la más norteña de la Cuenca de La Popa se ubican en el campo de cratón interior, mientras que, una de Las Presas Norte y El Delgado se ubican en el campo de transicional reciclado, siendo estas dos últimas muestras las que no coinciden con los diagramas anteriores.

Otro diagrama utilizado para determinar el marco tectónico es el ternario QpLvLs de Dickinson & Suczek (1979), en el cual se determinó que aproximadamente más de la mitad de las muestras se ubican dentro del campo de fuentes de orógenos de colisión, coincidiendo con los resultados de los diagramas anteriores, algunas de las muestras caen fuera de los campos pero siempre acercándose al de orógenos de colisión; mientras que, una de ellas, de la localidad Microondas, se ubica dentro del campo de fuentes de orógenos de arco (Fig. 4-12).

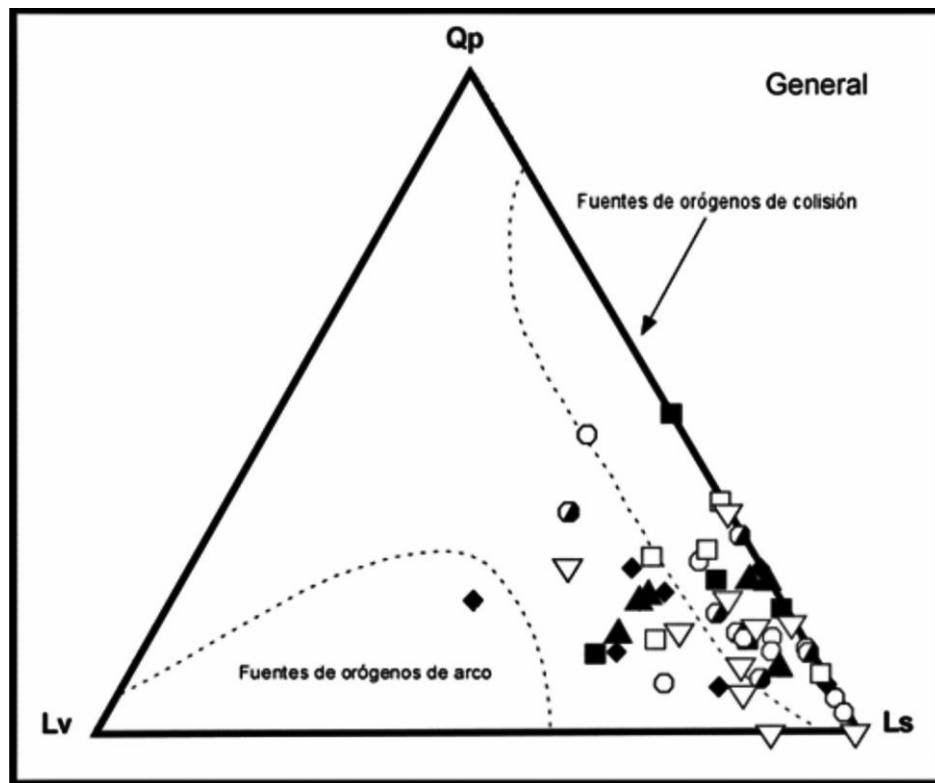


Fig. 4-12: Diagrama ternario QpLvLs para discriminar áreas fuente (Dickinson & Suczek, 1979).

Por otra parte, los fragmentos líticos pueden darnos también pistas sobre el área fuente y al ser los componentes más inestables de las areniscas, presentan una menor resistencia a los procesos de transporte (Ocampo Díaz, 2007). En el caso de la Fm. Muerto, se observa un enriquecimiento en los líticos de tipo sedimentarios, lo que sugiere una considerable aportación de alguna fuente de este tipo, quizá un orógeno recién levantado al momento de la depositación (Fig. 4-13).



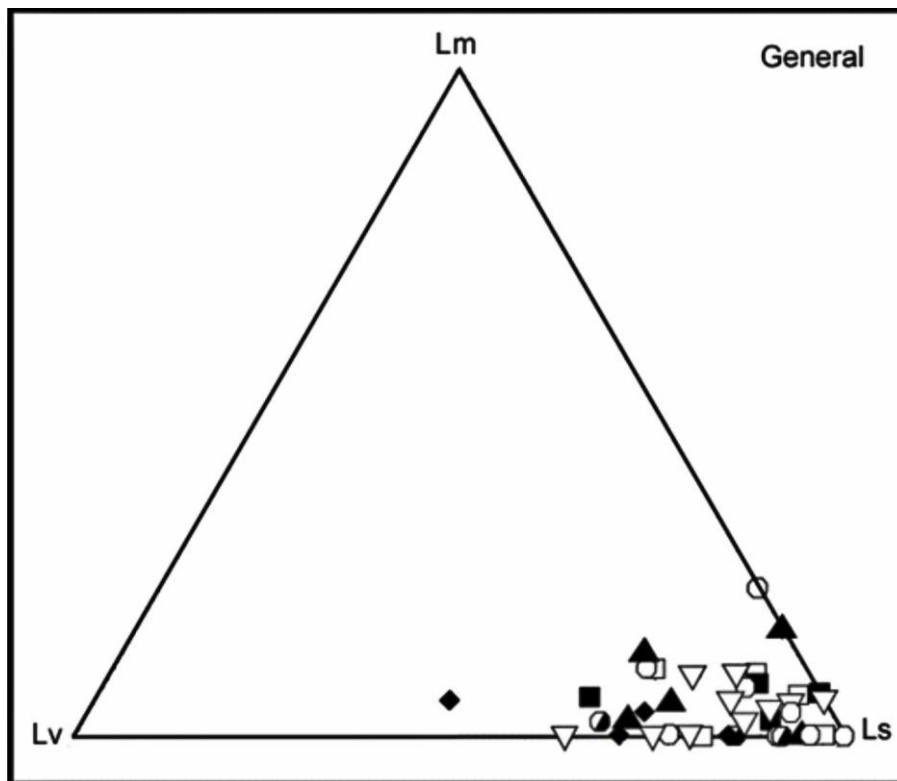


Fig. 4-13: Diagrama para determinar la relación entre los tipos de fragmentos líticos (Dickinson et al., 1983).

#### 4.6 Conclusiones de la Petrografía

En resumen, la totalidad de las muestras analizadas presentan una procedencia del tipo orógeno reciclado, enriquecidas principalmente en cuarzo y fragmentos líticos del tipo sedimentario.

## 5 Geoquímica

### 5.1 Introducción

El conocer detalladamente la composición de las rocas detríticas permite determinar su procedencia; por lo que para ello se aplicaron análisis geoquímicos que complementarán la información obtenida mediante la petrografía.

Específicamente la composición de las areniscas está influenciada por la procedencia sedimentaria, la naturaleza de los procesos sedimentarios dentro de la cuenca deposicional, así como por el tipo de trayectoria que vincula al área fuente con la cuenca de depositación. Dichos factores son controlados por la Tectónica de Placas, la cual ultimadamente controla la distribución de los diferentes tipos de areniscas (Dickinson & Suczek, 1979).

Para la presente investigación fue necesario llevar a cabo análisis de elementos mayores por medio de espectrofotometría de emisión óptica acoplada a plasma inductivamente (ICP-ES) y de elementos traza así como tierras raras, mediante espectrofotometría de masas acoplada a plasma inductivamente (ICP-MS), por lo que las muestras fueron enviadas al Laboratorio ACME en Vancouver, Canadá para su análisis.

### 5.2 Elementos mayores y elementos trazas

Las condiciones de intemperismo y clima pueden inferirse por la aplicación de una variedad de índices químicos basados en la abundancia de elementos mayores (Englund & Jørgensen, 1973; Bjørlykke, 1974; Nesbitt & Young, 1982).

En lo que respecta a dichos elementos, algunos investigadores como Bathia (1983) han propuesto una clasificación de los sedimentos finos (como areniscas y lutitas) en función del

ambiente tectónico en el cual son depositados y la procedencia de dichos sedimentos a partir de su contenido en elementos mayores.

**Tabla 5-1: Clasificación de los ambientes tectónicos, cuencas sedimentarias así como tipos de procedencia relacionados a la concentración de elementos mayores (Bathia, 1983).**

Ambiente tectónico	Cuenca de depósito dominante	Naturaleza de la corteza adyacente a la cuenca	Tipo de procedencia
Arco de islas oceánico	Tras -arco y ante-arco	Arco formado sobre corteza oceánica o bien sobre corteza continental delgada	Arcos magmáticos no disectados
Arco de islas continental	Intra-arco, tras-arco, ante-arco	Arco formado sobre corteza continental	Arco magmático disectado u orógeno reciclado
Margen continental activo	Cuencas marginales, <i>foreland</i> , transtensivas y transpesivas	Corteza continental gruesa o basamento cristalino	Basamento levantado
Margen continental pasivo	Cuencas pericratónicas y márgenes de <i>riffs</i> continentales	Corteza continental	Orógenos levantados e interior de cratones

Algunos autores como McLennan et al. (1993), así como Roser & Korsch (1986), proponen también diagramas de discriminación para ambientes tectónicos a partir de la relación  $K_2O/Na_2O$  vs  $SiO_2$ .

Por su parte, Roser & Korsch (1986) resaltaron la influencia que posee el tamaño de grano en las concentraciones de elementos mayores en los sedimentos proponiendo un diagrama de discriminación de  $K_2O/Na_2O$  vs  $SiO_2$ , el cual permite distinguir a los sedimentos de ambientes tectónicos como margen continental activo, margen continental pasivo, así como arco de islas oceánico. Uno de los inconvenientes de las relaciones entre elementos mayores sería que elementos como Na, Ca, K, Sr, Cs, Rb, Ba, Fe, Mn, Pb y, en ocasiones, el Cr sean altamente móviles a bajas temperaturas.

Por otra parte, diversos elementos encontrados en lutitas así como en areniscas, tales como Th, Sc, Zr, Hf y Co no presentan alteración durante los diferentes procesos sedimentarios (e.g. diagénesis, metamorfismo) debido a su baja concentración en agua de mar y ríos, su corto tiempo de residencia así como su insolubilidad, lo que los convierte en buenas herramientas para

determinar ambientes tectónicos y efectuar análisis de procedencia (Bathia & Crook, 1986; Taylor & McLennan, 1985; McLennan, 1989).

Entretanto, Jenchen (2001) propone que la abundancia de elementos traza tanto móviles como inmóviles puede correlacionarse con asociaciones de minerales que puedan ser típicos de áreas fuente distintas. Por último, Cullers et al. (1988) demostraron que los elementos considerados inmóviles como La y Th son más abundantes en rocas de tipo félsico que en rocas máficas, acaeciendo lo contrario para Sc y Co; de esta manera, las relaciones entre los radios La/Sc, Th/Sc, Th/Co y La/Co en sedimentos con tamaño de partícula de arena permiten efectuar una distinción entre una fuente de tipo máfica y una de tipo félsica.

### 5.3 Diagramas de elementos mayores

La presencia de elementos mayores en la composición de las areniscas de la Fm. Muerto presenta pocas variaciones.

**Tabla 5-2: Concentración de elementos mayores**

Concentración de Elementos Mayores (%m/m)												
Clave	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	CO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MnO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI
Microondas												
MM01	67.44	6.37	1.71	0.54	11.11	8.22	1.97	1.07	0.04	0.17	0.06	9.5
MM02	73.13	9.28	2.29	0.72	4.7	3.29	2.87	1.32	0.02	0.2	0.08	5.4
MM03	68.84	7.6	1.44	0.58	9.48	7.3	2.69	0.83	0.05	0.22	0.07	8.2
MM04	26.11	58.95	8.12	2.75	1.09	1.78	10.01	2.34	0.97	0.07	0.25	0.08
Boca de Potrerillos												
BP01	57.31	7.87	1.87	0.72	15.21	12.69	3.03	0.6	0.06	0.32	0.12	12.8
BP02	55.76	7.36	1.46	0.57	16.75	13.49	2.87	0.58	0.08	0.3	0.08	14.1
BP03	72.17	5.89	1.02	0.27	9.5	7.3	2.55	0.39	0.04	0.15	0.05	7.9
BP04	65.71	7.19	1.32	0.54	11.49	8.87	2.6	0.84	0.04	0.4	0.09	9.6
BP05	72.1	6.19	0.81	0.36	9.31	7.63	2.39	0.77	0.03	0.16	0.05	7.8
BP06	58.7	7.02	1.72	0.65	15.11	12.69	2.64	0.59	0.05	0.4	0.09	12.9
BP07	64.84	6.83	1.47	0.55	12.12	9.79	2.52	0.7	0.04	0.28	0.09	10.4
BP08	33.24	4.77	1.37	0.75	31.02	27.06	1.96	0.38	0.11	0.2	0.14	25.9
BP09	58.27	7.19	1.71	0.67	15.37	12.36	2.73	0.6	0.05	0.39	0.09	12.8
Las Presas Norte												

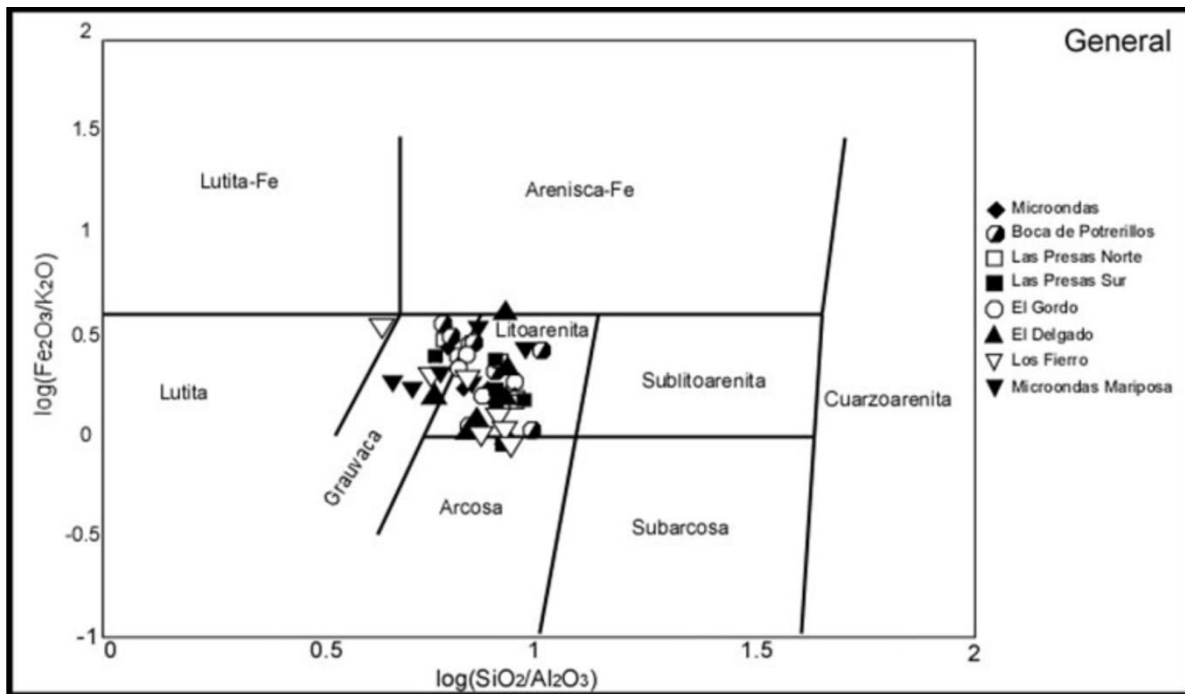
Concentración de Elementos Mayores (%m/m)												
Clave	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	CO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MnO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI
LP01	68.57	6.4	1.48	0.52	10.49	8.62	2.07	0.96	0.03	0.16	0.06	9.1
LP02	56.61	8.04	2	0.8	15.19	12.14	2.97	0.65	0.06	0.37	0.14	13.1
LP03	49.12	4.52	1.24	0.49	22.99	18.81	1.38	0.81	0.06	0.12	0.06	19.1
LP04	69.6	7.14	1.7	0.58	9.15	7	2.56	0.72	0.04	0.23	0.07	8.1
LP05	62.43	5.83	1.1	0.47	14.71	11.95	2.15	0.74	0.05	0.15	0.06	12.2
Las Presas Sur												
LP06	69.3	7.39	1.44	0.6	9.35	7.41	2.55	0.84	0.03	0.24	0.07	8.1
LP07	68.29	7.14	1.36	0.55	10.1	8.14	2.45	0.94	0.04	0.19	0.06	8.8
LP08	60.92	6.39	1.45	0.56	14.8	12.5	2.33	0.64	0.05	0.24	0.08	12.4
LP09	52.2	7.79	2.21	0.9	17.89	14.23	2.35	0.9	0.05	0.33	0.12	15.1
El Gordo												
EG01	71.12	8.91	2.41	0.87	6.37	4.71	2.71	0.95	0.03	0.27	0.08	6.3
EG02	75.18	7.53	1.09	0.41	6.15	4.48	2.4	1.19	0.03	0.17	0.06	5.8
EG03	69.72	9.12	2.41	0.83	6.9	5.09	3.04	1.13	0.04	0.23	0.07	6.5
EG04	65.95	9.32	3.18	1.12	8.21	6.01	2.84	1.14	0.04	0.3	0.08	7.8
EG05	65.95	7.46	1.71	0.69	11.22	8.48	2.43	1.06	0.04	0.26	0.07	9.4
EG06	67.39	6.31	1.38	0.4	11.16	8.48	2.03	0.75	0.04	0.14	0.07	10.2
EG07	60.29	5.48	1.49	0.68	15.89	12.37	1.61	0.99	0.05	0.14	0.06	13.3
EG08	68.39	8.39	1.37	0.59	9.13	6.84	2.83	1.25	0.04	0.21	0.06	7.6
El Delgado												
ED01	67.99	8.03	1.37	0.51	9.73	6.73	2.17	1.14	0.04	0.17	0.06	8.8
ED02	68.38	8.47	1.7	0.67	8.37	6.31	2.42	1.63	0.03	0.24	0.08	8
ED03	70.16	7.02	1.2	0.42	9.1	7.04	2.54	0.77	0.03	0.16	0.06	8.3
ED04	68.35	6.75	1.39	0.49	10.37	7.87	2.37	0.64	0.03	0.17	0.06	9.4
ED05	45.64	6.82	1.31	0.51	22.64	17.52	2.2	0.84	0.08	0.15	0.05	19.7
ED06	27.06	2.7	1.43	0.39	36.38	28.62	0.94	0.35	0.1	0.08	0.05	30.4
ED07	67.77	6.68	1.03	0.4	11.19	8.29	2.01	1.06	0.03	0.15	0.06	9.5
Los Fierro												
LF01	22.36	4.49	2.32	0.98	36.93	29.92	1.12	0.65	0.1	0.2	0.09	30.6
LF02	61.61	6.41	1.26	0.51	14.43	11.84	2.05	0.99	0.04	0.17	0.07	12.4
LF03	59.53	7.94	1.9	0.67	13.77	10.89	2.9	0.75	0.06	0.33	0.11	11.9
LF04	74.99	8.56	1.38	0.57	4.99	4.11	2.89	1.34	0.02	0.24	0.07	4.9
LF05	71.09	7.11	1.18	0.47	8.5	7.22	2.53	1.07	0.04	0.24	0.07	4.9
LF06	72.72	7.11	1.1	0.43	7.79	6.05	2.55	1.21	0.04	0.19	0.05	6.7
LF07	72.6	7.12	1.07	0.42	7.79	6.42	2.55	1.21	0.04	0.19	0.05	6.9
LF08	52.08	7.88	2.03	0.82	17.86	14.85	2.48	1.01	0.07	0.34	0.11	15.2
LF09	66.41	8.2	2.17	0.73	9.66	7.52	2.75	1.1	0.05	0.24	0.07	8.5
Microondas Mariposa												
Ma01	60.99	8.33	2.15	0.84	12.65	9.67	3.03	0.63	0.06	0.29	0.08	10.8
Ma02	66.05	9.57	2.18	1.04	8.91	6.62	3.18	1.07	0.04	0.27	0.07	7.6

Concentración de Elementos Mayores (%m/m)												
Clave	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	CO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MnO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI
Ma03	71.15	6.53	1.05	0.36	9.35	7.3	2.66	0.64	0.05	0.15	0.05	8
Ma04	68.16	6.29	0.88	0.33	11.58	8.94	2.63	0.53	0.06	0.18	0.05	9.3
Ma05	67.64	8.16	2.03	0.74	9.24	7.15	2.77	0.99	0.04	0.2	0.06	8.1
Ma06	57.46	11.14	3.56	1.56	10.64	8.18	2.09	1.92	0.04	0.57	0.17	10.8
Ma07	60.13	6.48	0.82	0.43	15.43	12.11	2.86	0.46	0.03	0.17	0.06	13.1
Ma08	69.64	8.18	1.22	0.4	8.66	6.92	3.84	0.35	0.03	0.21	0.06	7.4
Ma09	72.4	6.54	1.39	0.51	8.43	6.69	2.56	0.51	0.03	0.17	0.06	7.4
Ma10	57.54	9.95	2.29	1.19	12.67	10.01	3.03	1.31	0.04	0.4	0.12	11.4
Ma11	64.96	8.06	1.2	0.52	11.32	8.18	3.41	0.59	0.04	0.22	0.06	9.6
Ma12	63.53	7.76	2	0.61	11.67	8.98	2.48	1.1	0.05	0.37	0.08	10.3
Ma13	65.15	8.05	2.01	0.71	10.56	7.91	2.69	1.09	0.05	0.27	0.08	9.3

### 5.3.1 Tipo de roca

Mediante el diagrama binario de Herron, 1988 (Fig. 5-1), en donde se enfrentan el log (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) vs log (SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), las areniscas de la Fm. Muerto quedan clasificadas como litarenitas en su mayoría, seguidas por grauvacas y, en menor medida, lutitas y arcosas. Se observan altos valores de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, lo que indica un transporte mayor así como un alto grado de alteración, además de un contenido considerable de minerales arcillosos debido a la alteración de los feldespatos por el largo transporte además de enriquecerse en cuarzo, lo cual concuerda con los resultados obtenidos mediante los análisis petrográficos (Tucker, 2005). Por otra parte, su alto contenido en K<sub>2</sub>O da indicios de un alto grado de reciclamiento y de enriquecimiento diagenético. Además, los altos valores de dichos elementos, tanto de K<sub>2</sub>O y de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, son indicativos de márgenes pasivos. La muestra que cayó en los campos de las lutitas, podría deberse a que ha recibido un transporte todavía mayor, lo que propició la disolución total de los feldespatos.

Por otra parte, las localidades Microondas Mariposa y Los Fierro, se encuentran fuera de la Cuenca de La Popa, ya en los límites con la Cuenca de Parras, y muestran una alteración mayor respecto a las muestras ubicadas dentro de la cuenca en cuestión.



**Fig. 5-1: Diagrama binario  $\log(\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O})$  vs  $\log(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$  para determinar tipos de roca (según Herron, 1988).**

En el diagrama binario de Roser & Korsch, 1986 (Fig. 5-2) se observan diferentes tipos de procedencia mostrando una irregularidad de las muestras graficadas. Se observan valores altos del radio  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  lo que muestra un enriquecimiento en cuarzo. Por otro lado, se obtuvieron bajos valores del radio  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ , lo que indica una mayor alteración de los feldespatos y, por consiguiente, un enriquecimiento en el contenido arcilloso. Los valores anteriores indican un aumento en la madurez de las muestras además de un grado mayor de reciclamiento y un transporte mayor, características de un margen de tipo pasivo. Por otro lado, la irregularidad de las muestras al ser graficadas y, por consiguiente, la obtención de diferentes tipos de procedencia, podría deberse a que las muestras han sido empobrecidas en el contenido de feldespatos por la acción de procesos sedimentarios como el reemplazamiento por arcillas o carbonatos además de la disolución total o parcial de los feldespatos (López-Elizondo, 2006), lo cual coincide con los resultados obtenidos anteriormente mediante la petrografía.

Por otra parte, del total de las muestras analizadas, las más enriquecidas en cuarzo son dos correspondientes a la localidad de Boca de Potrerillos. Además, las muestras que en general recibieron un transporte mayor, evidenciado por su alto contenido de  $Al_2O_3$ , corresponden a las localidades ubicadas al sur de la cuenca: Los Fierro y Microondas Mariposa.

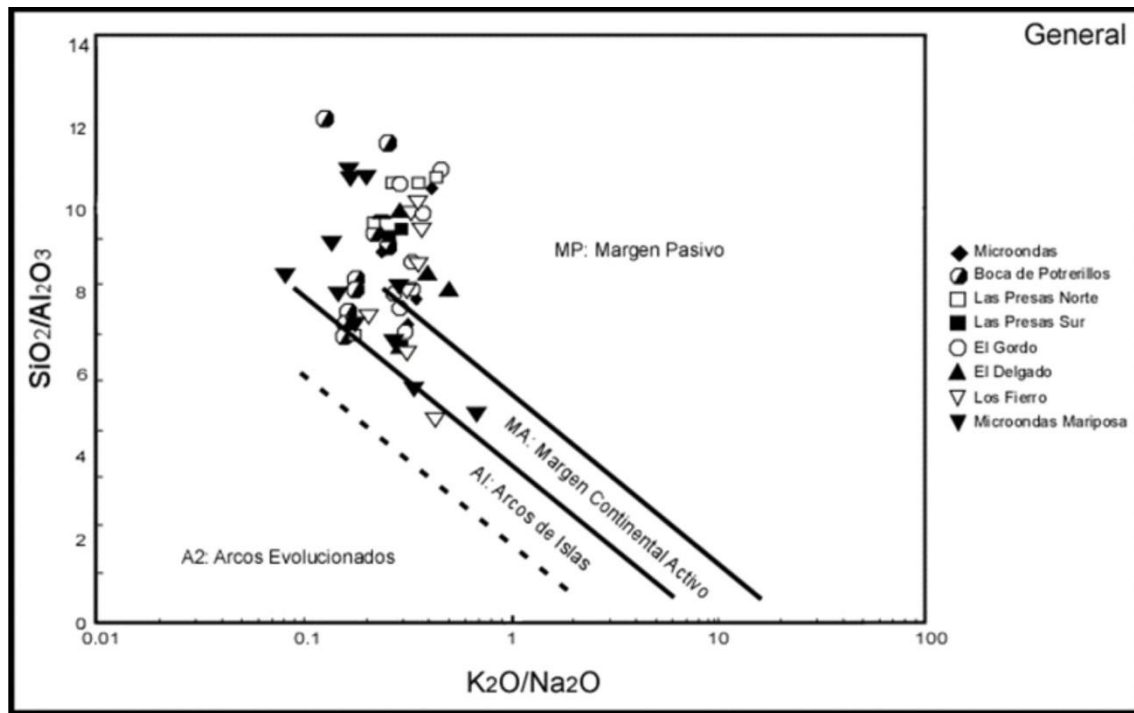


Fig. 5-2: Diagrama binario  $SiO_2/Al_2O_3$  vs  $K_2O/Na_2O$  según Roser y Korsch (1986)

#### 5.4 Diagramas de elementos traza

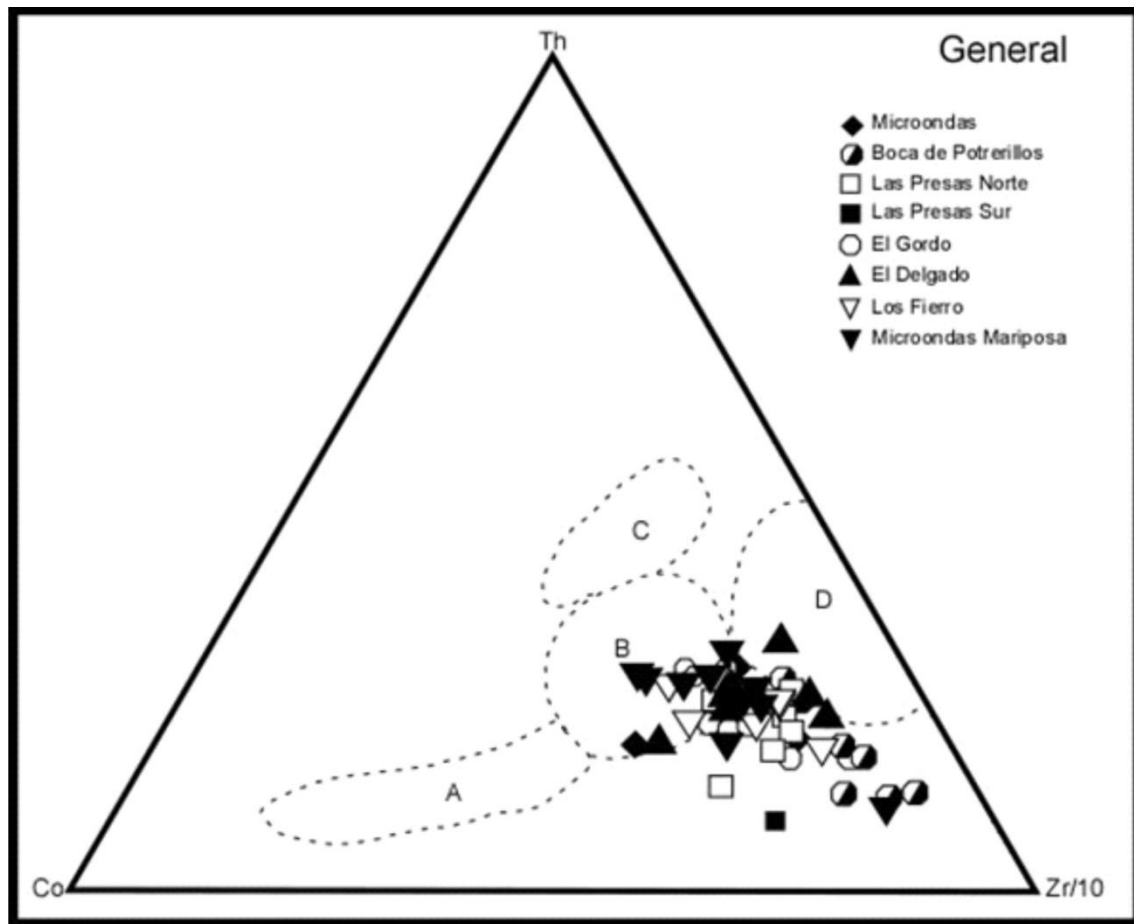
Concentraciones de Elementos Trazas (en ppm)																	
Clave	Sc	V	Co	Ni	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Ba	Hf	Pb	Th	U	Cs
Microondas																	
MM01	4	41	2	7	21	4	24	547	12	59	1.9	370	1.8	4	2.4	1	0.6
MM02	4	42	2	5	22	7	34	290	11	65	3.2	388	2	3	3.1	0.9	1.3
MM03	4	43	2	7	23	5	24	402	11	87	3	223	2.4	5	2.4	0.9	0.8
MM04	11.9	5	27	5	8	28	6	28	608	12	77	3.2	378	0.2	5	2.7	1
Boca de Potrerillos																	
BP01	6	51	3	9	46	5	19	531	14	92	4.2	256	2.4	6	3.8	1.1	1
BP02	5	50	2	6	24	5	16	567	10	127	3.9	315	3.3	6	3.1	1	0.8
BP03	3	24	1	5	16	3	11	263	8	46	2.1	239	1.2	8	1.9	0.8	0.6



Concentraciones de Elementos Traza (en ppm)																	
Clave	Sc	V	Co	Ni	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Ba	Hf	Pb	Th	U	Cs
BP04	5	49	2	6	24	4	20	454	10	254	5	573	7	3	3.6	1.2	1
BP05	3	33	2	5	13	5	19	308	8	53	2	513	1.4	2	2	0.9	0.9
BP06	5	54	3	7	24	6	17	471	11	251	5	520	7.1	5	3.5	1.3	0.6
BP07	4	49	2	6	23	5	19	456	11	153	3.4	499	4.1	4	3.3	1.2	0.7
BP08	3	36	2	4	14	3	12	626	10	99	2.8	350	3.1	3	3.5	1	0.6
BP09	5	55	4	6	23	6	18	477	11	216	5.1	375	5.6	4	3.4	1.2	0.7
Las Presas Norte																	
LP01	4	35	2	5	16	4	22	442	11	56	2.1	914	1.4	4	2.5	1	0.7
LP02	6	57	3	10	45	5	21	525	15	125	4.9	207	3.6	6	4.1	1.4	1
LP03	3	30	1	4	15	3	19	763	9	48	1.5	210	1.4	2	1.8	0.9	0.8
LP04	4	39	3	6	19	5	18	407	10	104	3	635	3	6	2.7	1	0.8
LP05	4	33	2	5	15	4	17	483	10	51	2.1	277	1.4	4	2.1	0.8	0.7
Las Presas Sur																	
LP06	4	35	2	5	19	5	22	412	10	74	3	600	2.2	3	2.8	1	0.7
LP07	4	31	2	6	19	5	23	378	10	59	2.4	412	1.7	3	2.7	1	0.7
LP08	4	47	2	5	20	4	17	539	11	132	3.2	518	3.5	5	2.9	1	0.7
LP09	6	57	3	10	29	6	27	602	14	128	4.1	320	3.7	5	3.7	1.2	1.4
El Gordo																	
EG01	5	43	3	8	32	7	29	301	13	94	3.7	239	2.7	7	3.1	1.1	1.6
EG02	3	30	2	4	18	5	28	320	8	58	2.3	408	1.9	2	2.8	0.9	1.5
EG03	4	44	2	6	22	7	29	424	10	65	3.1	400	2.1	3	2.6	0.9	1.3
EG04	5	55	4	7	31	8	32	386	13	96	4.3	389	2.9	6	3.4	1.2	1.4
EG05	4	42	3	6	20	6	28	487	12	114	3.5	313	3.4	13	2.7	1	1
EG06	3	35	2	4	16	4	20	379	10	46	1.9	150	1.4	4	2.3	0.7	1
EG07	3	32	2	4	14	4	22	466	9	54	1.9	406	1.5	3	1.8	0.8	0.7
EG08	4	42	3	7	20	6	36	372	12	67	3.1	344	2	5	3.5	1.1	1.4
El Delgado																	
ED01	3	25	2	4	16	6	31	364	9	58	2.8	240	1.9	6	2.5	0.9	1.6
ED02	5	46	3	6	30	7	41	328	13	87	3.7	558	2.6	2	3.5	1.3	1.4
ED03	2	27	2	4	14	4	22	425	7	54	2.5	1143	1.7	5	2	0.8	0.9
ED04	3	25	1	5	21	4	20	300	13	62	2.4	224	1.8	4	1.9	0.7	0.9
ED05	3	34	1	2	16	5	24	940	12	53	2.9	161	1.6	3	2.7	1	1
ED06	2	17	2	1	10	2	10	1477	9	35	1	167	1	8	1.2	0.7	0.5
ED07	4	26	1	3	17	5	29	498	10	56	2	192	1.8	3	2	0.8	1.3
Los Fierro																	
LF01	4	40	3	6	23	4	21	993	9	64	2.5	119	1.6	5	2.4	1.2	1.6
LF02	4	34	2	5	20	5	23	473	10	53	2	325	1.6	3	2.5	0.8	0.9
LF03	5	48	3	8	34	6	21	469	13	156	4.6	228	4.3	5	3.8	1.4	0.9
LF04	5	36	2	6	24	6	33	199	10	81	3.3	405	2.2	2	2.9	1	0.9
LF05	4	29	2	6	20	4	26	352	9	65	2.5	297	1.8	4	2.6	0.8	0.8

Concentraciones de Elementos Traza (en ppm)																	
Clave	Sc	V	Co	Ni	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Ba	Hf	Pb	Th	U	Cs
LF06	4	31	2	7	24	4	28	317	9	67	2.7	358	2	4	2.3	0.9	1
LF07	4	31	2	5	19	5	28	321	9	73	2.9	350	2	4	2.8	0.9	1
LF08	6	56	4	10	39	5	30	526	15	128	4.6	268	3.5	6	4.1	1.5	1.6
LF09	5	52	3	7	26	5	28	419	11	59	3.3	299	1.6	6	2.9	1	1.4
Microondas Mariposa																	
Ma01	5	60	3	8	27	7	22	469	13	105	4.8	127	3	6	4.3	1.3	0.9
Ma02	5	52	5	8	29	9	38	397	15	82	4.4	194	2.5	9	4.6	1.7	1.3
Ma03	3	27	2	4	18	4	18	348	10	55	2	234	1.8	5	2.4	0.8	0.5
Ma04	3	26	2	4	13	4	17	468	10	61	2.5	145	1.9	3	2.3	0.9	0.5
Ma05	4	47	4	8	31	7	31	385	12	69	3.1	364	2.1	5	3.7	1.4	1
Ma06	10	104	6	16	55	12	72	373	22	161	8.9	349	4.9	5	7.5	2.3	4.1
Ma07	3	27	2	3	10	4	14	586	10	68	2.5	124	1.8	2	2.7	1.4	0.5
Ma08	4	38	3	6	22	7	13	339	11	65	3.1	100	1.7	7	3.2	1.1	0.5
Ma09	4	39	2	5	23	6	17	306	11	73	2.4	180	2.1	2	2.7	1.1	0.5
Ma10	8	87	6	10	33	10	48	531	16	161	5.4	326	4.5	4	5.2	1.6	1.9
Ma11	4	43	2	6	20	5	17	492	11	62	3.1	179	2	3	3.3	1	0.6
Ma12	5	55	3	6	25	6	34	472	13	235	5	497	6.7	4	3.1	1.4	1.4
Ma13	5	45	4	8	32	6	33	469	13	103	4.2	496	2.9	5	3.1	1.3	1.2

Bathia & Crook (1986) proponen el diagrama ternario Th-Co-Zr/10 (Fig. 5-3) para discriminar ambientes tectónicos en donde las muestras analizadas no caen dentro de los campos pero muestran una tendencia evidente hacia un enriquecimiento en circón y posterior reciclamiento, lo que puede deberse a un transporte mayor de los sedimentos antes de depositarse. Las muestras de Boca de Potrerillos se destacan de las demás debido a que son las que muestran un reciclamiento aún mayor respecto al resto y, una de la localidad Microondas, se aparta de la tendencia general ubicándose cerca del vértice del cobalto. La tendencia mostrada en la localidad Boca de Potrerillos podría deberse a su lejanía respecto al área fuente al igual que la localidad Microondas.



**Fig. 5-3: Diagrama ternario Th vs Co vs Zr/10 para determinar ambientes tectónicos según Bathia & Crook (1986); A: Arco de islas oceánico, B: Arco de isla continental, C: Margen continental activo, D: Margen pasivo.**

McLennan et al. (1993), proponen el diagrama binario Th/Sc vs Zr/Sc para determinar el reciclamiento y variación composicional de las muestras (Fig. 5-4). En dicho diagrama, las muestras exhiben un agrupamiento evidente en los límites del manto con la corteza superior mostrando una tendencia hacia un enriquecimiento en circonio lo que es debido a un mayor transporte y posterior reciclamiento además de mostrar una tendencia hacia una fuente de tipo ácido. En este diagrama, las muestras de la localidad Boca de Potrerillos se destacan nuevamente, ya que son las que exhiben un reciclamiento mayor respecto al resto de las muestras analizadas, lo que puede deberse al prolongado transporte y a su lejanía respecto al área fuente.



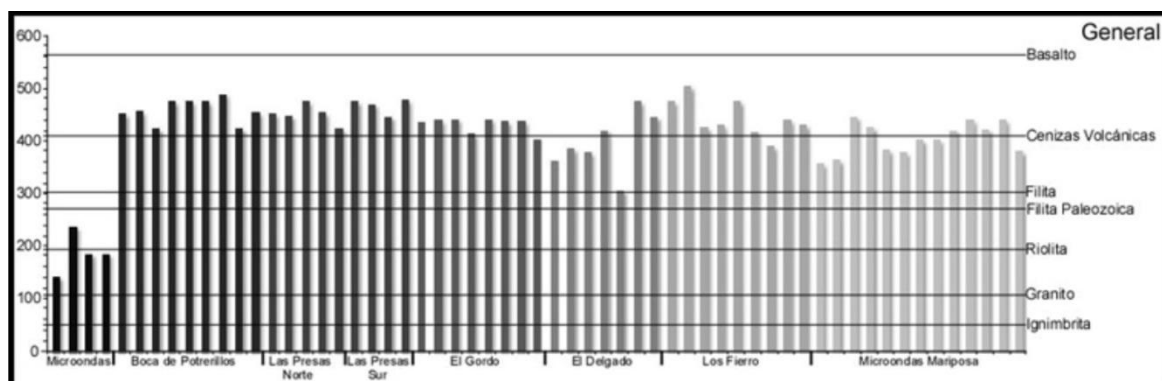


Fig. 5-5: Ti/Nb según Jenchen & Rosenfield, 2002 para determinar tipos de áreas fuente.

## 5.6 Tierras raras

Las abundancias naturales de los elementos de tierras raras (REE) son ampliamente utilizadas como herramienta geoquímica (Basu et al., 1982). Estos elementos son insolubles y se encuentran en pequeñas cantidades en el agua de mar así como en los ríos, por ello, su procedencia en los sedimentos es el factor de mayor importancia que contribuye al contenido de estos elementos (McLennan, 1989).

Tabla 5-3: Concentraciones de Tierras Raras

Concentraciones de Tierras Raras (en ppm)														
Clave	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Microondas														
MM01	8	17.7	2.31	10.7	2.02	0.59	1.98	0.33	1.93	0.37	1.1	0.18	1.08	0.17
MM02	10.7	21.5	2.81	11.8	2.12	0.56	1.9	0.32	1.93	0.35	1.06	0.17	1.11	0.15
MM03	9.7	19	2.35	9.9	1.98	0.56	1.96	0.33	1.97	0.39	1.1	0.17	1.04	0.15
MM04	1	10.1	22.1	2.86	12.5	2.57	0.84	2.28	0.39	2.23	0.38	1.07	0.15	1.05
Boca de Potrerillos														
BP01	11.3	24.6	3.14	13.2	2.76	0.84	2.82	0.46	2.33	0.48	1.32	0.21	1.28	0.2
BP02	9.2	18.7	2.35	10.4	1.92	0.7	1.94	0.32	1.81	0.38	1.11	0.18	1.06	0.17
BP03	5.7	11.5	1.5	7	1.43	0.49	1.56	0.25	1.49	0.3	0.87	0.13	0.84	0.12
BP04	10.7	22.7	2.79	11.1	2.2	0.59	2.09	0.36	1.92	0.4	1.16	0.19	1.26	0.2
BP05	6.6	13.4	1.71	6.9	1.35	0.49	1.47	0.24	1.58	0.3	0.83	0.13	0.93	0.15
BP06	10.6	24.3	2.87	11.1	2.18	0.61	2.07	0.35	2	0.4	1.22	0.19	1.26	0.22
BP07	10.4	22.8	2.77	11.2	2.23	0.6	2.15	0.35	1.95	0.4	1.18	0.19	1.21	0.19
BP08	12.1	25.2	2.85	10.5	2.01	0.93	1.89	0.3	1.76	0.32	0.96	0.15	0.85	0.14
BP09	11.2	24.5	2.89	11.3	2.32	0.61	2.2	0.35	2.05	0.4	1.21	0.2	1.25	0.2

Concentraciones de Tierras Raras (en ppm)														
Clave	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Las Presas Norte														
LP01	8.3	16.7	2.18	9.5	1.91	0.52	1.86	0.33	1.84	0.38	1.06	0.16	1.09	0.16
LP02	12.9	28.2	3.59	15.3	3.11	0.82	2.94	0.5	2.61	0.51	1.48	0.22	1.37	0.22
LP03	6.6	13.9	1.78	6.9	1.53	0.44	1.49	0.26	1.47	0.28	0.88	0.14	0.82	0.13
LP04	7.9	17.4	2.22	9.3	1.92	0.54	1.9	0.31	1.76	0.35	1.07	0.16	1.05	0.17
LP05	6.9	13.7	1.83	7.6	1.61	0.51	1.52	0.28	1.66	0.33	0.89	0.15	0.93	0.15
Las Presas Sur														
LP06	8.9	17.8	2.23	9.2	1.85	0.52	1.79	0.3	1.62	0.34	1	0.15	0.97	0.15
LP07	8.1	16.2	2.18	9.5	1.81	0.56	1.91	0.32	1.77	0.36	1.01	0.17	1.01	0.16
LP08	9.5	21.4	2.69	10.2	2.19	0.63	2.17	0.37	1.88	0.38	1.14	0.17	1.08	0.16
LP09	12.5	25	3.25	13.3	2.82	0.7	2.65	0.44	2.43	0.48	1.32	0.21	1.36	0.2
El Gordo														
EG01	12.4	25.8	3.33	14.4	2.83	0.64	2.63	0.44	2.46	0.42	1.32	0.19	1.23	0.18
EG02	8.4	16.2	2.14	9.2	1.68	0.47	1.48	0.26	1.46	0.27	0.93	0.14	0.92	0.14
EG03	9.7	19.2	2.42	10	1.96	0.68	1.86	0.31	1.68	0.33	1.05	0.17	0.99	0.16
EG04	10.8	22.5	2.83	11.7	2.17	0.58	2.1	0.39	2.16	0.42	1.25	0.21	1.2	0.19
EG05	9.9	20.4	2.56	10.6	2.06	0.63	2	0.38	2.1	0.39	1.19	0.16	1.14	0.17
EG06	8.1	18.3	2.41	11.3	1.99	0.73	1.95	0.32	1.83	0.35	0.94	0.14	0.88	0.12
EG07	5.9	11.9	1.57	7.5	1.41	0.42	1.47	0.24	1.35	0.27	0.81	0.12	0.83	0.12
EG08	9.4	19.7	2.54	10.7	2.14	0.6	1.89	0.36	1.96	0.39	1.17	0.17	1.03	0.15
El Delgado														
ED01	11.3	23.6	2.93	11.9	2.16	0.74	1.95	0.33	1.67	0.33	0.95	0.15	0.88	0.13
ED02	11.9	24.2	3.15	13.4	2.7	0.65	2.19	0.42	2.23	0.4	1.21	0.19	1.16	0.16
ED03	7.2	14.8	1.85	7.3	1.55	0.47	1.35	0.23	1.25	0.23	0.78	0.12	0.74	0.11
ED04	8.1	18.1	2.69	12.6	2.67	0.61	2.48	0.44	2.26	0.42	1.2	0.18	1.05	0.16
ED05	11	22.4	2.92	13.6	2.79	0.91	2.26	0.4	1.93	0.35	1.03	0.15	0.95	0.15
ED06	7.5	16.1	2.08	9.2	1.72	0.53	1.51	0.26	1.39	0.27	0.79	0.1	0.7	0.09
ED07	8.4	17.3	2.16	9.4	1.79	0.48	1.77	0.3	1.61	0.33	1.02	0.15	1	0.13
Los Fierro														
LF01	9.9	21.2	2.59	10.6	2.03	0.63	1.81	0.3	1.54	0.33	0.88	0.13	0.85	0.13
LF02	8.5	16.1	2.08	8.7	1.78	0.5	1.71	0.29	1.69	0.34	0.94	0.16	0.91	0.15
LF03	11.1	23.9	3.04	12.8	2.57	0.64	2.45	0.41	2.29	0.46	1.28	0.2	1.32	0.2
LF04	8.9	17.8	2.33	9	1.9	0.44	1.77	0.31	1.74	0.34	1.04	0.17	1.08	0.16
LF05	8	16.1	2.07	9	1.71	0.52	1.64	0.28	1.63	0.31	0.95	0.5	1	0.14
LF06	7.7	15.1	1.91	8.5	1.55	0.46	1.59	0.26	1.48	0.33	0.89	0.15	0.95	0.15
LF07	7.9	16	2.06	8.5	1.6	0.5	1.55	0.27	1.54	0.34	0.99	0.15	0.96	0.16
LF08	12.9	26.4	3.31	13.8	2.75	0.78	2.69	0.44	2.49	0.5	1.42	0.22	1.42	0.22
LF09	8.6	18.1	2.33	10	2.07	0.6	1.97	0.34	1.9	0.39	1.14	0.18	1.09	0.16
Microondas Mariposa														
Ma01	10.8	22.8	2.88	11.5	2.37	0.63	2.37	0.42	2.13	0.45	1.22	0.21	1.19	0.17

Concentraciones de Tierras Raras (en ppm)														
Clave	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Ma02	13.7	28.3	3.69	14.5	3.05	0.89	2.87	0.48	2.56	0.51	1.34	0.24	1.32	0.2
Ma03	6.9	14.4	1.9	7.8	1.49	0.46	1.55	0.27	1.63	0.31	0.89	0.13	0.89	0.11
Ma04	7.7	15.3	1.99	8	1.75	0.5	1.82	0.26	1.5	0.31	0.9	0.13	0.86	0.12
Ma05	12.2	22.9	2.88	11	2.23	0.61	2.09	0.35	2.08	0.4	1.13	0.17	1.14	0.16
Ma06	20.8	44	5.69	21.9	4.59	1.02	4.17	0.74	4.14	0.74	2.26	0.34	2.02	0.32
Ma07	9.9	19	2.34	9.2	1.79	0.49	1.76	0.26	1.58	0.29	0.94	0.13	0.94	0.12
Ma08	10.4	21.2	2.68	10.5	2.1	0.58	1.88	0.32	1.86	0.34	1.02	0.13	0.98	0.12
Ma09	7.6	16.4	2.12	8.6	1.78	0.5	1.68	0.29	1.57	0.33	1.07	0.14	1.06	0.15
Ma10	15.3	34.7	4.34	17.5	3.47	0.7	3.04	0.51	2.77	0.51	1.57	0.23	1.58	0.21
Ma11	8.7	19	2.32	10.4	1.97	0.57	1.96	3.4	1.87	0.36	1.08	0.2	1.06	0.16
Ma12	11.3	23.1	2.87	12.1	2.38	0.65	2.17	0.38	2.17	0.43	1.28	0.23	1.32	0.21
Ma13	11	23.1	3.02	13.1	2.52	0.72	2.41	0.43	2.32	0.45	1.37	0.21	1.2	0.18

Elementos como Na, Ca, Mg y Sr son rápidamente movilizadas durante los procesos sedimentarios, mientras que elementos como Ti, Zr, Hf, Nb, Ta, Th, Ni y Co así como las tierras raras son transferidos principalmente de la corteza continental superior hacia el sedimento (McLennan et al., 2003). De este modo, las tierras raras presentes en un mismo sedimento son transportados en forma de partículas reflejando así la química de su procedencia. Por otra parte, los procesos como la meteorización y la diagénesis poseen una influencia escasa en la redistribución de tierras raras no llegando a provocar cambios en la química del sedimento (Rollinson, 1993). Además, tanto en aguas superficiales de baja temperatura como en aguas hidrotermales, la abundancia de estos elementos es relativamente baja (McLennan, 1989).

Además, Bhatia & Crook (1986), determinaron que las concentraciones de Ce, La, Nd, Th, Zr así como las relaciones Ba/Sr, Rb/Sr, La/Y y Ni/Co aumentan al disminuir la concentración de Sc. Sin embargo, las mejores relaciones en la determinación de ambientes tectónicos son Sc/Cr y La/Sc además de la elevada concentración de Zr en un margen continental pasivo debido a que el contenido de este último elemento permite diferenciar un margen continental activo ya que se trata de sedimentos mayormente retrabajados, de ahí el alto contenido de Zr. Entretanto, la relación La/Y nos permite diferenciar el ambiente de arco de islas continental además del margen continental activo.

Por lo anterior, los diagramas de mayor importancia para elementos traza y tierras raras son el diagrama binario de La/Y vs Sc/Cr además del diagrama ternario Sc-Th-Zr/10 (Bhatia & Crook, 1986).

Por su parte, Jenchen (2001) demostró que las concentraciones así como las distribuciones de tierras raras son dependientes del área fuente, además un indicador importante para la determinación del área fuente lo constituye el coeficiente Ti/Nb, el cual proporciona directamente información sobre el tipo de roca diferenciando también entre rocas ígneas y metamórficas (Jenchen, 2001; Jenchen & Rosenfield, 2002).

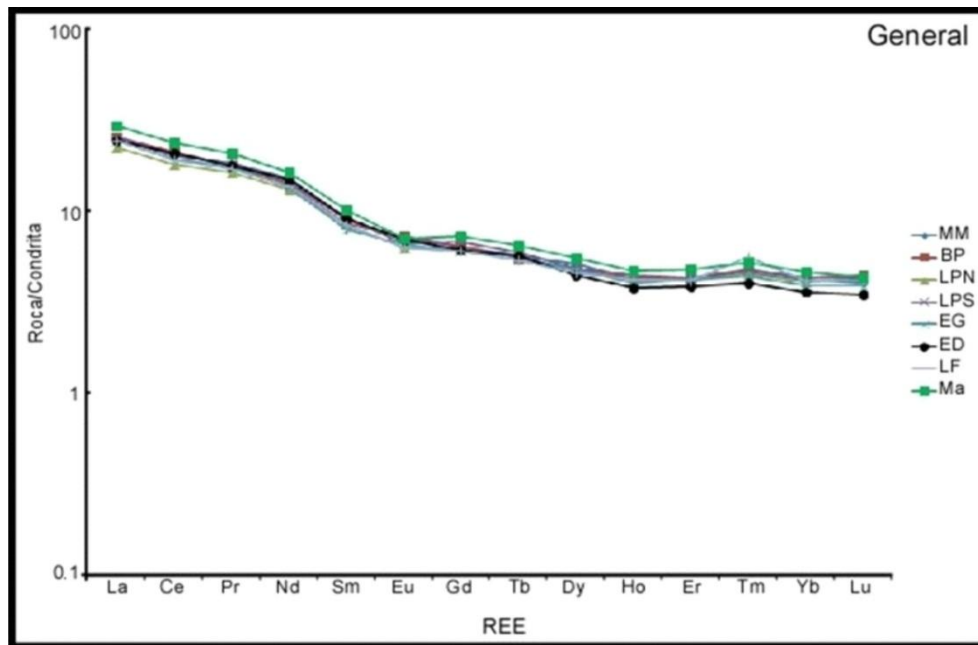
Tomando en cuenta a otros investigadores como McLennan et al. (1993) quienes caracterizaron los ambientes tectónicos por medio de su contenido de cuarzo y las relaciones Si/Al, K/Na, Th/Sc, La/Sc y La/Yb, además de una anomalía negativa de Eu y concentraciones variables de la relación Th/U, se puede decir que dichos autores establecieron cuatro tipos de procedencia:

- **Corteza continental superior antigua** (derivada de terrenos ígneos y metamórficos antiguos y sedimentos maduros): Se encuentran caracterizados por elevadas concentraciones de elementos litófilos así como altas relaciones Th/Sc, La/Sm, entre otros. Por lo regular poseen una alta relación Th/U asociada al ciclo de intemperismo y anomalías negativas de Eu además de relaciones  $\epsilon^{0.143\text{Nd}/144\text{Nd}} < -10$ .
- **Arcos jóvenes indiferenciados** (fuente volcánica/plutónica con partición de plagioclasas): Poseen concentraciones variables de elementos litófilos además de una variable relación Th/Sc, La/Sm, etc. Tienen también una baja relación Th/U  $< 3$  y una relación  $\epsilon^{0.143\text{Nd}/144\text{Nd}} > +5$ .
- **Arcos jóvenes diferenciados** (fuente volcánica/plutónica con partición de plagioclasas): Tienen relaciones Eu/Eu\*  $< 1$ , composición similar al anterior pero con relaciones más elevadas (positivas) de  $\epsilon^{0.143\text{Nd}/144\text{Nd}}$ .
- **MORB** (mucho menos común): Contienen bajas relaciones Th/Sc, La/Sm, Th/U y altas cantidades de  $\epsilon^{0.143\text{Nd}/144\text{Nd}}$ , distinguiéndose de los arcos jóvenes indiferenciados



por su alto contenido de elementos ferromagnesianos (Cr, Ni, etc.) y una baja relación  $(Ba/La)_N$ .

Taylor & McLennan (1985) proponen un diagrama de tipo araña de abundancias de tierras raras para determinar el estilo de magmatismo del área fuente (Fig. 5-6) en el cual se observa un enriquecimiento en el contenido de tierras raras ligeras y consiguiente enriquecimiento en tierras raras pesadas, lo que indica un magmatismo de tipo básico que coincide con los resultados obtenidos en diagramas anteriores. Por otra parte, la baja abundancia de este tipo de elementos en las muestras analizadas puede deberse a la abundancia de cemento calcáreo, lo cual se constató en el análisis petrográfico. Además, la mayoría de las muestras exhibe una cierta uniformidad en el contenido de dichos elementos, quizá debido a una mezcla eficiente de litologías durante los procesos sedimentarios (López-Elizondo, 2006).



**Fig. 5-6: Diagrama de multielementos normalizados a condritas según Taylor & McLennan, 1985.**

Por otro lado, la localidad Microondas vuelve a destacarse, mostrando una irregularidad bastante marcada en una de sus muestras que consiste en una anomalía en el contenido de Tm; mientras que, la localidad El Gordo, en una de sus muestras, exhibe una marcada anomalía de

europio. Dichas localidades poseen una ubicación estratégica, al ser la primera (Microondas), la más norteña y limítrofe de la cuenca; la segunda, ubicada al sur de la cuenca y fuera de la misma; y la tercera, en las inmediaciones de un cuerpo salino. Las condiciones anteriores podrían haber afectado a la abundancia de estos elementos.

## **5.7 Cambios estadísticos en la composición**

Aunque no se presentan variaciones significativas en la composición de la Fm. Muerto, las principales diferencias se dan en cuanto al contenido de elementos mayores y elementos traza ya que en lo referente a los primeros, las variaciones son menores; pero en cuanto a los segundos, se observan variaciones mínimas pero evidentes.

### **5.7.1 Elementos mayores**

La Fm. Muerto presenta variaciones bastante minúsculas en su contenido de elementos mayores a diferencia de los elementos traza cuyas variaciones aunque mínimas son más evidentes. Lo anterior podría deberse a que los procesos sedimentarios y de intemperismo suelen afectar más a este tipo de elementos.

En el contenido del radio  $\text{SiO}_2/\text{K}_2\text{O}$  se observa un agrupamiento evidente de todas las localidades no reflejando diferencias significativas. La presencia de sílice domina sobre el contenido de dióxido de potasio lo que podría traducirse como producto de un transporte mayor ya que se alteraron y desaparecieron las ortoclasas aumentando de esta manera la presencia de contenido arcilloso y resultando en un mayor enriquecimiento de cuarzo (Fig. 5-7).

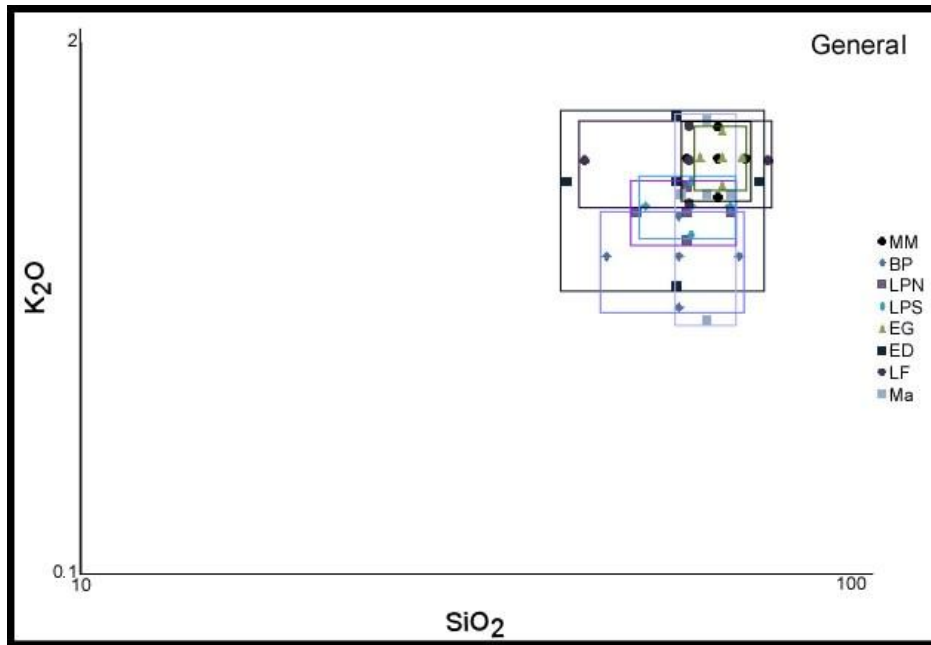


Fig. 5-7: Diagrama de desviación estándar para el radio  $\text{SiO}_2/\text{K}_2\text{O}$ .

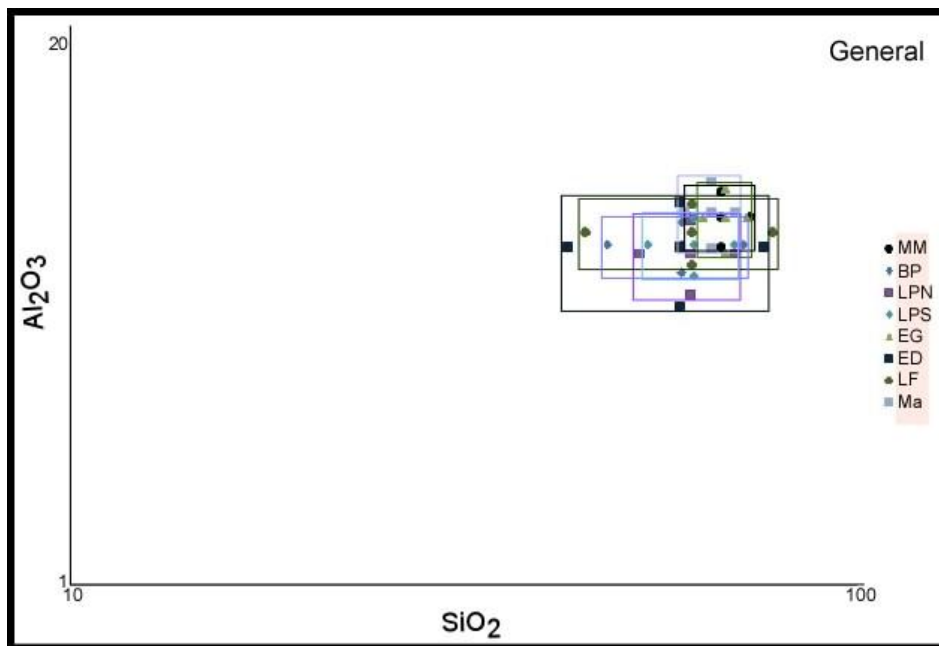
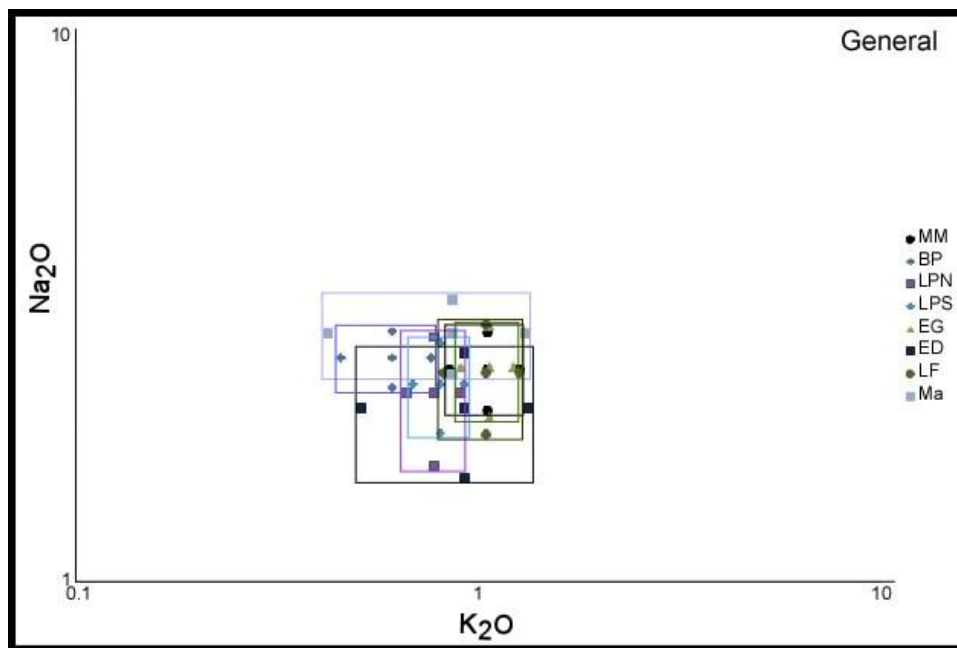


Fig. 5-8: Diagrama de desviación estándar para el radio  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ .

El radio  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  presenta un comportamiento similar al radio anterior ya que la agrupación de las localidades y sus variaciones insignificantes se hacen evidentes. Al igual que el radio  $\text{SiO}_2/\text{K}_2\text{O}$  se observa un enriquecimiento en el contenido de sílice y un empobrecimiento en el contenido de feldespatos, en este caso, de plagioclasa debido a un transporte prolongado (Fig. 5-8).

El radio  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  refleja la relación del contenido entre ortoclasas y plagioclasas. En este sentido se observan variaciones mínimas pero, al final de cuentas, evidentes. La presencia de  $\text{Na}_2\text{O}$  es ligeramente mayor respecto al  $\text{K}_2\text{O}$  lo que se traduce en una presencia mayor de plagioclasas sobre las ortoclasas lo cual es confirmado por los análisis petrográficos.



**Fig. 5-9: Diagrama de desviación estándar para el radio  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ .**

La localidad Microondas Mariposa presenta un contenido mayor de  $\text{Na}_2\text{O}$  mientras que Las Presas Norte es la que menos lo contiene. Ambas localidades se encuentran en la parte occidental de la cuenca, siendo Las Presas Norte más norteña que Microondas Mariposa. Lo anterior podría indicar una mayor cercanía de Microondas Mariposa respecto al área fuente.

Respecto al contenido de  $K_2O$ , El Delgado es la localidad con mayor presencia de este compuesto a diferencia de Microondas Mariposa que es la localidad con menor presencia de estos elementos.

En resumen, tanto el contenido de  $K_2O$  como de  $Na_2O$  disminuye hacia el sur, lo que indica que las localidades de Las Presas y El Delgado se ubican más cercanas al área fuente, lo que es confirmado por la petrografía y otros componentes geoquímicos.

### 5.7.2 Elementos traza

Los elementos trazas, a diferencia de los elementos mayores, presentan una mayor variación en su contenido. Este tipo de elementos suelen ser inmóviles y resultan ser menos afectados por los procesos de transporte, intemperismo y diagénesis por lo que suelen reflejar en mayor medida la composición del área fuente.

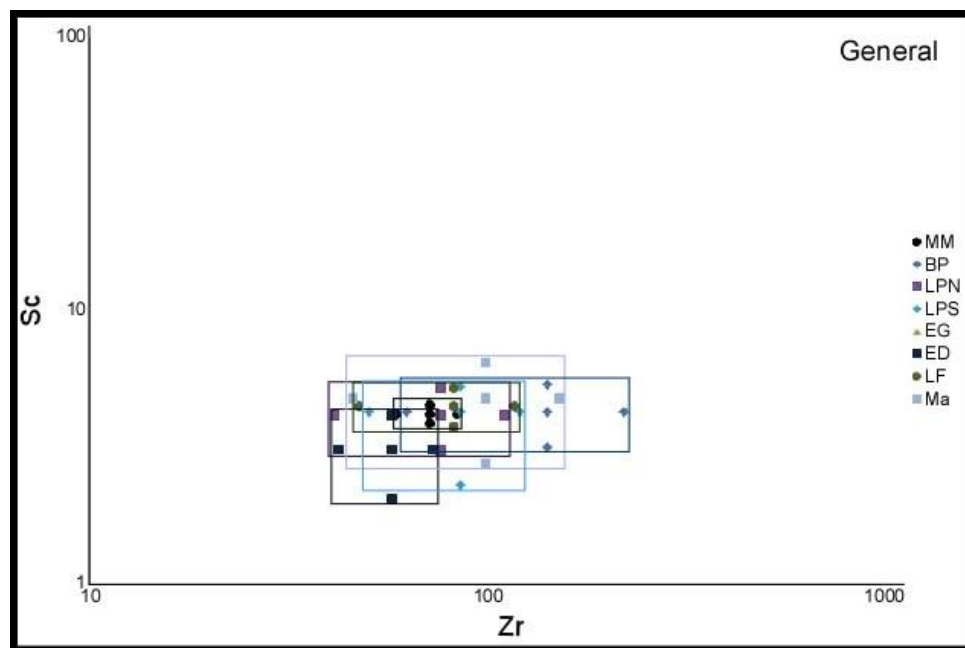
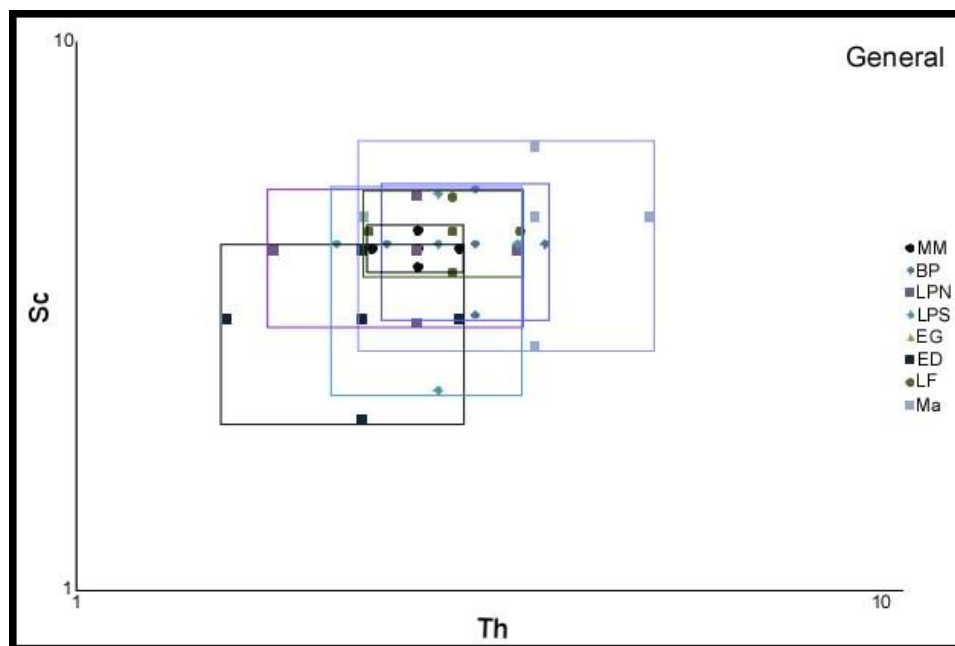


Fig. 5-10: Diagrama de desviación estándar para el radio Zr/Sc.

El ratio  $Zr/Sc$  refleja el grado de reciclamiento de los sedimentos por el contenido de circón, en este sentido, Las Presas Norte es la localidad con menor contenido de  $Zr$  mientras que Boca de Potrerillos es la localidad con el mayor contenido de  $Zr$  de las localidades estudiadas. Como se ha confirmado con otros esquemas geoquímicos, Boca de Potrerillos es la localidad con mayor reciclamiento por ubicarse en el lado Este de la cuenca y ser la más alejada del área fuente (Fig. 5-10).

El ratio  $Th/Sc$  es un indicador de los procesos de diferenciación química para rocas ígneas. Las variaciones en el contenido de este ratio se dan principalmente en las localidades El Delgado y Microondas Mariposa, ambas al sur del área de estudio. La primera contiene una presencia menor de ambos elementos mientras que Microondas Mariposa, al suroeste de la primera, contiene una presencia mayor.



**Fig. 5-11: Diagrama de desviación estándar para el ratio  $Th/Sc$**

De los elementos traza, el ratio  $Ti/Nb$  es el que presenta mayores variaciones, siendo Microondas Mariposa la localidad que presenta un mayor contenido de  $Nb$  pero un contenido uniforme de  $Ti$ , mientras que, El Gordo es la localidad con menos cantidad tanto de  $Nb$  como de

Ti lo que podría deberse a la presencia salina. Pero en general las variaciones son menores ya que el agrupamiento en un contenido alto de Ti y poco de Nb para todas las localidades es evidente (Fig. 5-11).

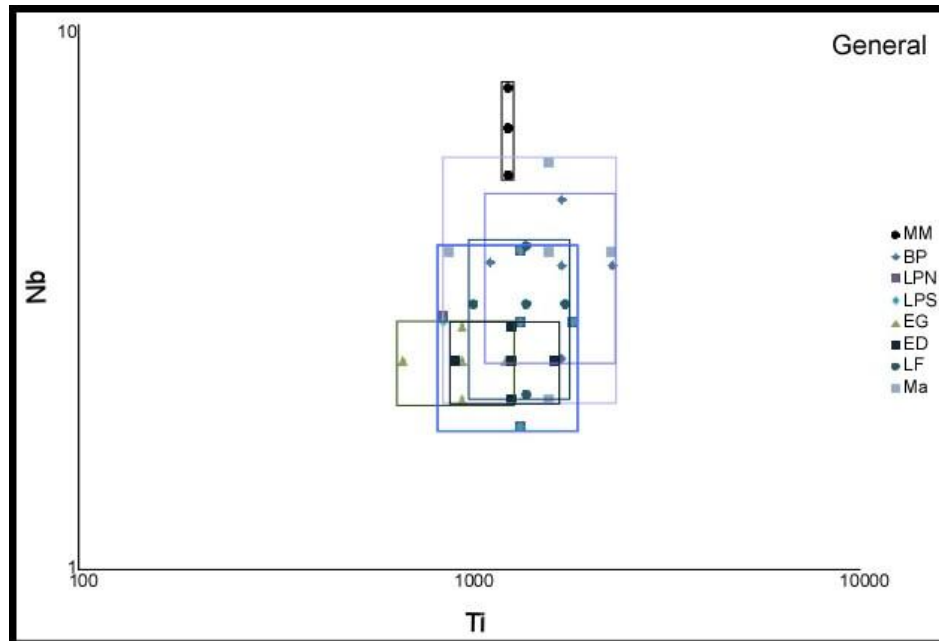


Fig. 5-12: Diagrama de desviación estándar para el radio Ti/Nb.

## 5.8 Conclusiones de la Geoquímica

Las variaciones en la composición suelen ser poco significativas por lo que todas las localidades exhiben un comportamiento bastante similar. La principal diferencia radica en los elementos traza donde las variaciones se vuelven más evidentes pero siendo mínimas aún.

## 6 Conclusiones y recomendaciones

La Fm. Muerto, al ser el primer flujo de detritos siliciclásticos que rellenó la Cuenca de La Popa, exhibe un comportamiento bastante interesante respecto a su composición geoquímica y su comportamiento petrográfico a lo largo y ancho de la cuenca.

Los detritos que constituyen las areniscas de esta formación, según los datos del presente estudio, proceden del occidente. La gran predominancia del cuarzo volcánico y plutónico, así como la disolución de gran parte de los feldespatos y la presencia de fragmentos líticos tanto volcánicos y metamórficos (estos últimos los menos frecuentes), sugiere una fuente del tipo de orógeno reciclado y clasificándose como litoarenitas tanto petrográfica como geoquímicamente. La Sierra Madre Occidental es el orógeno más cercano que cumple con dichas condiciones y se encuentra localizado en la dirección indicada.

Respecto al comportamiento geoquímico, los datos obtenidos confirman los resultados obtenidos mediante la petrografía. Los procesos más característicos están representados por el reciclamiento en la parte norte y de oeste a este de la cuenca, mientras que en la parte sur el principal factor que modifica la composición de las areniscas es la diagénesis.

Respecto a las variaciones en la composición, suelen ser poco significativas mostrando todas las localidades un comportamiento bastante similar. La principal diferencia radica en los contenidos de elementos mayores que no suelen presentar variaciones, mientras que en lo que respecta a los elementos traza las variaciones se vuelven más evidentes pero siendo mínimas también. Lo anterior refleja que los elementos traza, considerados inmóviles, suelen ser menos afectados por los procesos sedimentarios, lo que representa una ventaja de dichos elementos en los análisis de procedencia ya que reflejan mejor la composición del área fuente.



Por otra parte, la presencia salina ejerce cierta influencia en la sedimentación de la Fm. Muerto al disolver los feldespatos y alterar la señal geoquímica al paso por dichas estructuras volviéndola más uniforme.

Se recomienda efectuar estudios tanto petrográficos como geoquímicos en el límite noroeste de la cuenca, así como en localidades fuera de la misma en los límites de la Cuenca de Parras. Los estudios de minerales pesados podrían ayudar también a conocer más sobre la procedencia de dicha Formación.

---

## 7 Bibliografía

- Alvarado Molina, J.B. (2004): Estudio mineralógico y geoquímico del NE de México en las Formaciones La Casita, Taraíses y Carbonera. – Tesis de Licenciatura: 116 p.; Facultad de Ciencias de la Tierra Universidad Autónoma de Nuevo León; Linares, N.L.
- Aschoff, J.L. (2003): Sedimentation patterns in a salt-diapir influenced basin: Upper Cretaceous to Lower Tertiary Delgado Sandstone Tongue, Potrerillos Formation, La Popa Basin, Nuevo Leon, Mexico. – Master's Thesis: 259 p.; New Mexico State University at Las Cruces, Las Cruces, NM.
- Augustsson, C. & Bahlburg, H. (2003): Active o passive continental margin? Geochemical and Nd isotope constrains of metasediments in the backstop of a pre-Andean accretionary wedge in southermost Chile (46°30'-48°30'S). – *en*: McCann, T. & Saintot, A. (eds.): *Tracing Tectonic Deformation using the Sedimentary Record*. – Geological Society of London, Special Publications, **208**: 253-268.
- Basu, A., Young, S.W., Suttner, L.J., James, C.W. & Mack, G.H. (1975): Re-evaluation of the use of undulatory extinction and polycrystallinity in detrital quartz provenance interpretation. – *Journal of Sedimentary Petrology*, **45**, 873-882.
- Becerra González, C. (2006): Estudio geoquímico y mineralógico de la formación San Felipe, NE de México. – Tesis de Licenciatura: 124 p; Facultad de Ciencias de la Tierra Universidad Autónoma de Nuevo León; Linares, N.L.
- Bhatia, M.R. & Crook, K.A.W. (1986): Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins. – *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **92**: 181-193.
- Bhatia, M.R. (1983): Plate tectonics and geochemical composition of sandstones. – *Journal of Geology*, **91**: 611-627.

- 
- Bishop, A.B. (1970): Stratigraphy of Sierra de Picachos and vicinity, Nuevo León, Mexico. – AAPG Bulletin, **54 (7)**: 1245-1270.
- Bjørlykke, K. (1989): Sedimentology and Petroleum Geology. – 363 p.; Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Bradford, I.A. (2007): Provenance of the Difunta Group (Maastrichtian- Paleogene) as determined by petrography and detrital zircon U-Pb geochronology, La Popa and Parras Basins, Nuevo Leon, Mexico. – Master's Thesis: 209 p.; New Mexico State University at Las Cruces, Las Cruces, NM.
- Burrows, H.R. (1910): Geology of northern Mexico – Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, **7**: 85-103.
- Coney, P.J. (1983): Un modelo tectónico de México y sus relaciones con América del Norte, América del Sur y el Caribe. – Revista del Instituto Mexicano del Petróleo, **15**: 6-15.
- Critelli, S., Le Pera, E. & Ingersoll, R.V. (1977): The effects of source lithology, transport, deposition and sampling scale on the composition of southern California sand. – Sedimentology, **44**, 653-671.
- Cullers, R.L., Basu, A. & Suttner, L.J. (1988): Geochemical signature of provenance in sand-size material in soils and stream sediments near the Tobacco Root Batholith, Montana, U.S.A. – Chemical Geology, **70**: 335-348.
- Dickinson, W.R. & Suczek, C.R. (1979): Plate tectonics and sandstone composition. – AAPG Bulletin, **63 (12)**: 2164-2182.
- Dickinson, W.R., Beard, L.S., Grakenridge, G.R., Erjavec, J.L., Ferguson, R.C., Inman, K.F., Knepp, R.A., Lindberg, F.A. & Ryberg, R.T. (1983): Provenance of north American phanerozoic sandstones in relation to tectonic setting. – GSA Bulletin, **94**: 222-235.
- Dickinson, W.R. (1985): Interpreting provenance relations from detrital modes of sandstones. – *en*: Zuffa, G.G. (ed.): Provenance of Arenites: 333-361; D. Riedel, Dordrecht, Países Bajos.
- Dumble, E.T. (1982): Notes on the geology of the valley of the middle Rio Grande. – GSA Bulletin, **3**: 219-230.
-

- 
- Eguiluz de Antuñano, S. (2001): Geologic evolution and gas resources of the Sabinas Basin in Northeastern Mexico. – *en*: Bartolini, C., Buffler, R.T. & Cantú-Chapa, A. (eds.): The western Gulf of Mexico Basin: Tectonics, sedimentary basins, and petroleum systems. – AAPG Memoirs, **75**: 241-2700.
- Englund, J.O. & Jørgensen, P. (1973): A chemical classification system for argillaceous sediments and factors effecting their composition – Geologiska Foreningen i Stockholm Forhandlingar, **95** (1): 87-97.
- Folk, R.L. (1974): Petrology of sedimentary rocks. – 182 p.; Hemphill's, Austin, TX.
- Giles, K.A. & Lawton, T.F. (2002): Halokinetic sequence stratigraphy adjacent to the El Papalote Diapir, northeastern Mexico. – AAPG Bulletin, **86** (5): 823-840; Tulsa, OK.
- Goldhammer, R.K. (1999): Mesozoic sequence stratigraphy and paleogeographic evolution of northeast México. – Geological Society of America Special Paper **340**: 1-58.
- Heim, A. (1926): Notes on the Jurassic of Tamazunchale (Sierra Madre Oriental, Mexico) – Eclogae Geologicae Helvetiae, **20**: 84-87.
- Herron, M.M. (1988): Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data. – Journal of Sedimentary Petrology, **58**: 154-164.
- Hon, K.D. (2001): Salt-influenced growth-stratal geometries and structure of the Muerto Formation adjacent to an ancient secondary salt weld, La Popa Basin, Nuevo León, Mexico. – Master's Thesis: 97 p.; New Mexico State University at Las Cruces, Las Cruces, NM.
- Humphrey, W.E. (1949): Geology of the Sierra de los Muertos area, Mexico. – GSA Bulletin, **60**: 80-176.
- Humphrey, W.E. & Díaz, T. (1956): Jurassic and Lower Cretaceous stratigraphy and tectonics of northeast Mexico. – PEMEX file, NE-M-799, 186p; Mexico. D.F.
- Hudson, S.M. & Hanson, A.D. (2010): Thermal maturation and hydrocarbon migration within La Popa Basin, northeastern Mexico, with implications for other salt structures. – AAPG Bulletin, **94** (3): 273-291.
-

- 
- Imlay, W.R. (1936): Evolution of the Coahuila Peninsula, Mexico, part IV, Geology of the western part of the Sierra de Parras. – GSA Bulletin, **47**: 1091-1152.
- Imlay, W.R. (1937): Geology of the middle part of the Sierra de Parras, Coahuila, México.- GS America Bulletin, **48**: 587- 630.
- Imlay, W.R. (1940): Neocomian faunas of northern Mexico. – GSA Bulletin, **51**: 117- 190.
- Ingersoll, R.V. (1990): Actualistic sandstone petrofacies: discriminating modern and ancient source rocks. – Geology, **18**: 733-736.
- Ingersoll, R.V., Kretchmer, A.G. & Valles, P.K. (1993): The effect of sampling scale on actualistic sandstone petrofacies. – Sedimentology, **40**: 937-953.
- Jenchen, U. (2001): Fazies und Geochemie in kontinentalen Trias-Becken im westlichen Argentinien und in Patagonien (30°-50°). – Münstersche Forschungen zur Geologie und Paläontologie: 441 p.; Münster.
- Jenchen, U. & Rosenfeld, U. (2002): Continental Triassic in Argentina: Response to tectonic activity. – Journal of South American Earth Sciences, **15**: 461-479.
- Johnsson, M.J. (1993): The system controlling the composition of clastic sediments. – *en*: Johnsson, M.J. & Basu, A. (eds.): Processes controlling the composition of clastic sediments. – GSA Special Paper, **284**: 1-19.
- Kroeger, K.F. & Stinnesbeck, W. (2003): The Minas Viejas Formation (Oxfordian) in the area of Galeana Mexico: Significance of syndepositional volcanism and related barite genesis in the Sierra Madre Oriental. – *en*: Bartolini, C., Buffer, R.T. & Blickwede, J. (eds.): The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics. – AAPG Memoir **79**: 515-528.
- Laudon, R.C. (1996): Sal dome growth, thrust fault growth, and syndeformational stratigraphy, La Popa Basin, Northern Mexico. – Transactions of the Gulf Coast Association of Geological Societies, **46**: 219 – 228.
- Lawton, T.F., Giles, K.A., Vega, F.J. & Rosales-Domínguez, C. (2001): Stratigraphy and origin of the La Popa Basin, Nuevo Leon and Coahuila, Mexico. – *en*: Bartolini, C., Buffler, R.T. &

- 
- Cantu-Chapa, A. (eds.): The western Gulf of Mexico basin; tectonics, sedimentary basins, and petroleum systems. – AAPG Memoir, **75**: 219-240.
- Lawton, T.F., Shipley, K.W., Aschoff, J.L., Giles, K.A. & Vega-Vera, F.J. (2005): Basinward transport of Chicxulub ejecta by tsunami-induced backflow, La Popa Basin, northeastern Mexico, and its implications for distribution of impact-related deposits flanking the Gulf of Mexico. – *Geology*, **33** (2): 81-84.
- Lawton, T.F., Vega-Vera, F.J., Giles, K.A. & Rosales-Domínguez, C. (2001): Stratigraphy and origin of the La Popa Basin, Nuevo León and Coahuila, Mexico. – *en*: Bartolini, C., Buffler, R.T. & Cantú-Chapa, A. (eds.): The western Gulf of Mexico Basin: Tectonics, sedimentary basins, and petroleum systems. – AAPG Memoir, **75**: 219-240.
- Lawton, T.F., Bradford, I., Vega Vera, F.J., Gehrels, G.E. & Amato, J.M. (2009): Provenance of Upper Cretaceous – Paleogene sandstones in the foreland basin system of the Sierra Madre Oriental, northeastern Mexico, and its bearing on fluvial dispersal systems of the Mexican Laramide Province. – *GSA Bulletin*, **121** (5/6): 820 – 836.
- López Elizondo, O.H. (2006): Estudio petrográfico y geoquímico del Miembro San Pablo, Fm. La Casita en el área del Cañón Cortinas, S.M.Or., Noreste de México – Tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias de la Tierra Universidad Autónoma de Nuevo León, Linares, Nuevo León
- Márquez, B. (1979): Evaluación petrolera de sedimentos carbonatados del Cretácico en el Golfo de Sabinas, NE de México. – *Ingeniería Petrolera*, **19**(8): 28-36.
- Martínez López, M.J. (2009): Procedencia de rocas clásticas de la Fm. Muerto del Grupo Difunta, Noreste de México – Tesis de licenciatura: 136 p. Facultad de Ciencias de la Tierra Universidad Autónoma de Nuevo León; Linares, N.L.
- McBride, E.F. (1963): A classification of common sandstones. – *Journal of Sedimentary Petrology*, **33** (3): 664-669.
- McBride, E.F., Weidie, A.E. & Wolleben, J.A. (1975): Deltaic and associated deposits of Difunta Group (late Cretaceous to Paleocene), Parras and La Popa basins, northeastern Mexico. – *en*:
-

- 
- Broussard, M.L. (ed.): Deltas, models for exploration, 485-522; Houston, TX (Geological Society of Houston).
- McBride, E.F., Weidie, A.E., Wolleben, J.A. & Laudon, R.C. (1974): Stratigraphy and structure of the Parras and La Popa basins, northeastern Mexico. – *GSA Bulletin*, **84**: 1603-1622.
- McLennan, S.M. (1989): Rare earth elements in sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary processes. – *en*: Lipin, B.R. & McKay G.A. (eds.): *Geochemistry and Mineralogy of Rare Earth Elements*. – *Reviews in Mineralogy*, **21**: 169-200.
- McLennan, S.M., Hemming, S., McDaniel, D.K. & Hanson, G.N. (1993): Geochemical approaches to sedimentation, provenance and tectonics. – *en*: Johnsson, M.J. & Basu, A. (eds.): *Processes Controlling the Composition of Clastic Sediments*. – *GSA Special Paper*, **284**: 21-40.
- McLennan, S.M., Taylor, S.R., McCulloch, M.T. & Maynard, J.B. (1990): Geochemical and Nd-Sr isotopic composition of deep-sea turbidites: crustal evolution and plate tectonic associations. – *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **54**: 2015-2050.
- Milodowski, A.E. & Zalasiewicz, J.A. (1991): Redistribution of rare elements during diagenesis of turbidites/ hemipelagite mudrocks sequences of Llandovery age from central Wales. – *en*: Morton, A.C., Todd, S.P. & Haughton, P.D.W. (eds.): *Developments in sedimentary provenance studies*. – *Geological Society of London, Special Publications*: 101-124.
- Millán-Garrido, H. (2004): Geometry and kinematics of compressional growth structures and diapirs in the La Popa Basin of northeast Mexico; insights from sequential restoration of a regional cross section and three-dimensional analysis. – *Tectonics*, **23 (TC5011)**: 1-21; doi: 10.1029/2003TC001540.
- Moore, B.R. & Dennen, W.H. (1970): A geochemical trend in Silicon-Aluminium-Iron ratios and the classification of clastic sediments. – *Journal of Sedimentary Petrology*, **40 (4)**: 1147-1152.
- Murillo-Muñetón, G. (1999): Stratigraphic architecture, platform evolution, and mud-mound development in the Lower Cupido Formation (Lower Cretaceous), northeastern Mexico – Ph.D. dissertation: 53 p.; Texas A&M University, College Station.
-

- 
- Murray, G.E., Weidie, A.E.Jr., Boyd, D.R., Forde, R.H. & Lewis, P.D.Jr. (1962): Formational divisions of Difunta Group, Parras Basin, Coahuila and Nuevo León, Mexico. – AAPG Bulletin, **46 (3)**: 374-383.
- Ocampo Díaz, Y.E. (2007): Evolución sedimentológica y geoquímica del Miembro Arenoso Galeana (Formación Taraises) – Tesis de Maestría: 301 p. Facultad de Ciencias de la Tierra Universidad Autónoma de Nuevo León; Linares, N.L.
- Okada, H. (1971): Classification of sandstone: analysis and proposal. – Journal of Geology, **79**: 509-525.
- Orellana-Silva, E. (1967): Diccionario Inglés-Español de Ciencias de la Tierra – 335 p.; Madrid (Interciencia).
- Padilla y Sánchez, R.J. (1985): Las Estructuras de la Curvatura de Monterrey, Estados de Coahuila, Nuevo León, Zacatecas y San Luis Potosí. – Revista del Instituto de Geología UNAM, **6**: 1-20.
- Peterson-Rodríguez, R.H. (2001): Análisis estructural en el anticlinorio de La Casita, Sierra de Parras, Coahuila, México – Tesis de Maestría: 173 p.; Facultad de Ciencias de la Tierra Universidad Autónoma de Nuevo León, Linares, N.L.
- Pettijohn, F.J. (1963): Chemical composition of sandstones: excluding carbonate and volcanic sands: data of geochemistry. – U.S. Geological Survey Professional Paper, **440 (S)**: 1-21.
- Pettijohn, F.J., Potter, P.E. & Siever, R. (1973): Sand and sandstones. – 618 S.; Berlin (Springer).
- Pindell, J.L. (1985): Alleghanian reconstruction and subsequent evolution of the Gulf of Mexico, Bahamas and Proto-Caribbean. – Tectonics **4**: 1-39.
- Pindell, J.L. & Dewey, P.E.; Siever, R. (1982): Permo-Triassic reconstruction of western Pangea and the evolution of the Gulf of Mexico / Caribbean region. - Tectonics **1**: 179-211.
- Rollinson, H. (1993): Using geochemical data: Evaluation, Presentation, Interpretation – 352 p.; Essex (Longman).
-



- 
- Roser, B.P. & Korsch, R.J. (1988): Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data. – *Chemical Geology*, **67**: 119-139.
- Rowan, M.G., Lawton, T.F. & Giles, K.A. (2000): El Papalote Diapir, La Popa Basin, Mexico; an exposed analog for northern Gulf of Mexico salt-flank and subsalt structures. – AAPG Annual Meeting, New Orleans **2000**, Expanded Abstracts: 129.
- Rowan, M.G., Lawton, T.F., Giles, K.A. & Ratliff, R.A. (2003): Near-salt deformation in La Popa Basin, Mexico, and the northern Gulf of Mexico; a general model for passive diapirism. – *AAPG Bulletin*, **87 (5)**: 733-756.
- Salvador, A. (1991): Origin and development of the Gulf of Mexico Basin. – *en: The Gulf of Mexico Basin – Geological Society of America, The Geology of North America*, **v.J.**: 389-444.
- Sánchez-Zavala, J.L. & Centeno-García, E. (2005): Técnicas y aplicaciones al estudio de los sedimentos terrígenos de grano fino: procedencia y tectónica. – Artículo en línea: [http://www.geologia.unam.mx/index.php?option=com\\_content&task=view&id=709&Itemid=434](http://www.geologia.unam.mx/index.php?option=com_content&task=view&id=709&Itemid=434)
- Schultz-Ela, D.D. (2003): Origin of drag folds bordering salt diapirs. – *AAPG Bulletin*, **87 (5)**: 757-780.
- Sedlock, R.L., Ortega Gutiérrez, F. & Speed, R.C. (1993): Tectonostratigraphic terranes and tectonic evolution of Mexico – *GSA Special Paper*, **278**: 153 p.
- Sellards, E.H., W.S. Adquins, and F.B. Plummer, (1932): *The Geology of Texas*, v. I. – The University of Texas at Austin Bulletin, **32**: 996 p.
- Shelley, D.C. (2001): Sedimentology, stratigraphy and petrology of the Paleocene upper sandstone member of the Potrerillos Formation, La Popa Basin, Mexico. – Master's Thesis: 213 p.; New Mexico State University at Las Cruces, Las Cruces, NM.
- Stow, D.A.V. (2005): *Sedimentary rocks in the field a color guide*. – 320 p.; London, U.K. (Elsevier Academic Press).
-

- 
- Tarbuck E.J. & Lutgens, F.K. (2000): Ciencias de la Tierra: Una introducción a la Geología Física. – 2ª edición: 616 p. Madrid (Prentice Hall).
- Tardy, M. & Maury, R. (1973): Sobre la presencia de elementos de origen volcánico en las areniscas de los *flyschs* de edad cretácica superior de los estados de Coahuila y Zacatecas, México. – Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, **34**: 5-12.
- Taylor, S.R. & McLennan, S.M. (1985): The Continental Crust: its composition and evolution. – 312 p.; Oxford (Blackwell).
- Tucker, M. (2003): Sedimentary rocks in the field. – The Geological Field Guide Series, 3ª edición, 234 p.; Wiley Editorial.
- Tucker, M. (2005): Sedimentary Petrology. – 3ª edición: 261 p., Oxford (Blackwell).
- Vega, F.J. & Perrilliat, M.d.C. (1989): La presencia del Eoceno marino en la cuenca de La Popa (Grupo Difunta), Nuevo León. – Instituto de Geología, Revista, **8 (1)**: 67-70.
- Vega-Vera, F.J. & Perrilliat, M.d.C. (1989): Una nueva especie del genero *Costacopluma* (Arthropoda: Decapoda) del Maastrichtiano de Nuevo León. – Instituto de Geología, Revista, **8 (1)**: 84-87; México, D.F.
- Vega-Vera, F.J., Mitre-Salazar, L.M. & Martínez-Hernández, E. (1989): Contribución al conocimiento de la estratigrafía del Grupo Difunta (Cretácico superior-Terciario) en el noreste de México. – Instituto de Geología, Revista, **8 (2)**: 179-187; México, D.F.
- Vokes, E.H. (1963): Geology of the Cañon de la Huasteca area in the Sierra Madre Oriental, Nuevo León, Mexico. – Tulane University, New Orleans, Louisiana, Tulane Studies in Geology, v.**1**: 125-148.
- Weislogel, A.L. & Lawton, T.F. (2000): Salt diapir influence on local sedimentation patterns, Maastrichtian Muerto Formation, northeastern Mexico. – AAPG Annual Meeting, New Orleans, **2000**, Expanded Abstracts: 79.
- Willis, J.J., Lock, B.E., Ruberg, D.A. & Cornell, K.C. (2001): Field examination of exposed evaporite-related structures, United States and Mexico; relations to subsurface Gulf of Mexico examples. – *en*: Roberts, M.T., Barrett, M.L. & Czerniakowski, L. (eds.): GCAGS/GSSSEPM
-

transactions of the 51st annual convention; Odyssey to success, 100 years of Gulf Coast oil and gas 1901-2001. – Transactions - Gulf Coast Association of Geological, **51**: 399-408.

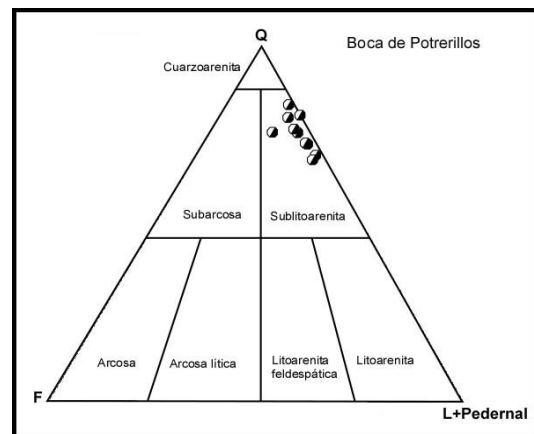
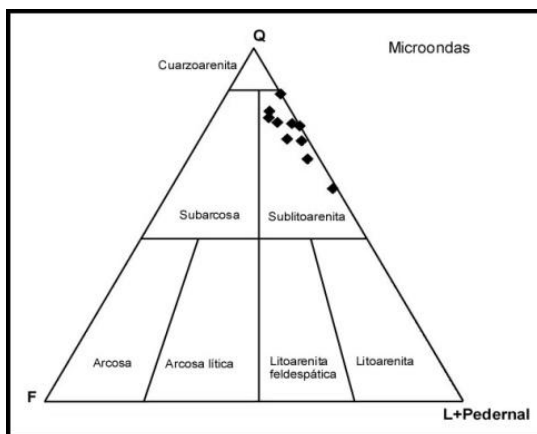
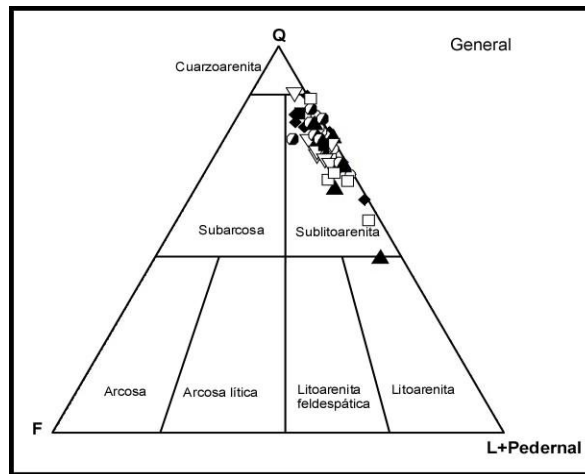
Wilson, J.L. (1990): Basement structural controls on Mesozoic carbonate facies in Northeastern Mexico: A review. – *en*: Tucker, M.E., Wilson, J.L., Crevello, P.D., Sarg, J.R., & Reads, J.F. (eds.): Carbonate platforms, facies, sequences and evolution. – International Association of Sedimentologists Special Publication, **9**: 235-255.

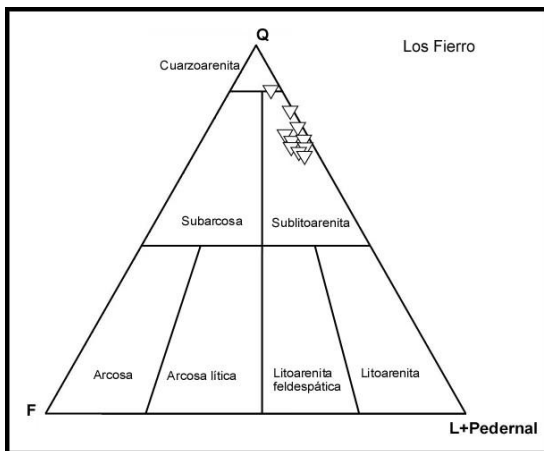
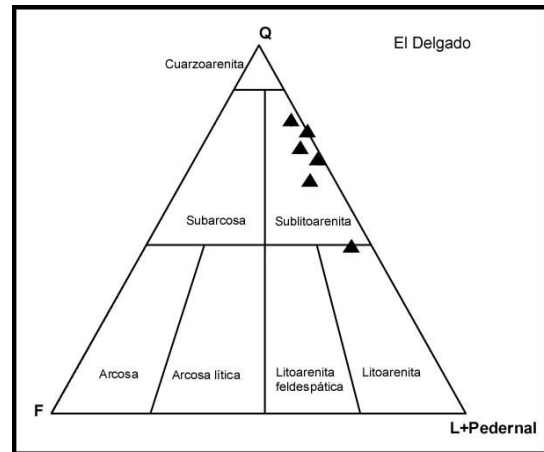
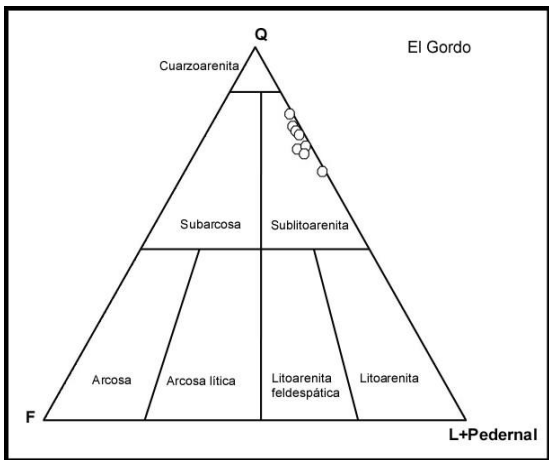
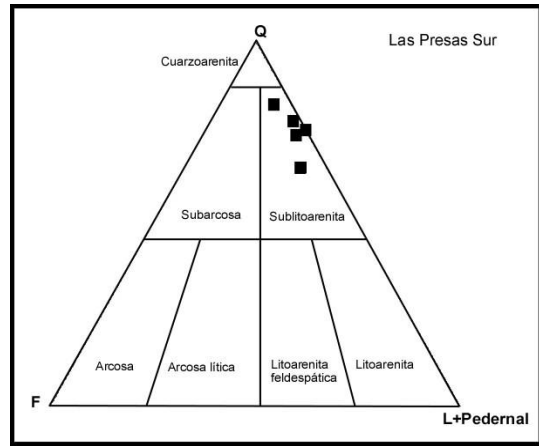
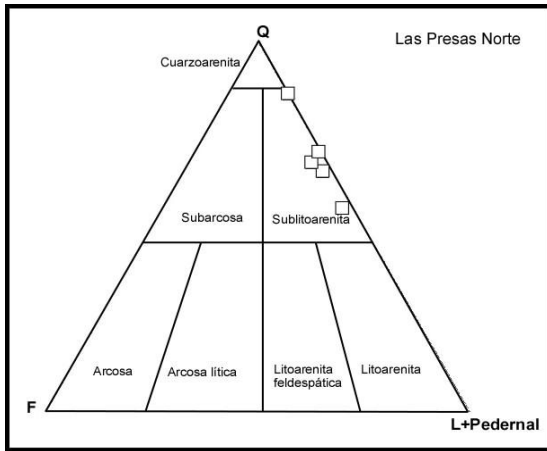
Ye, H. (1997): Sequence stratigraphy of the Difunta Group in the Parras-La Popa foreland basin, and tectonic evolution of the Sierra Madre Oriental, northeastern Mexico. – Doctoral Thesis: 198 p.; University of Texas at Dallas, Richardson, TX.

# Anexos

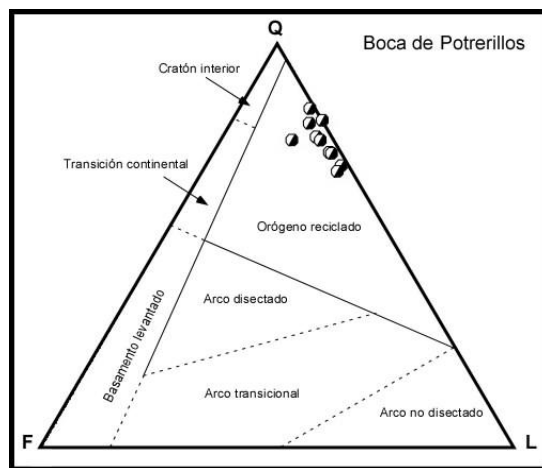
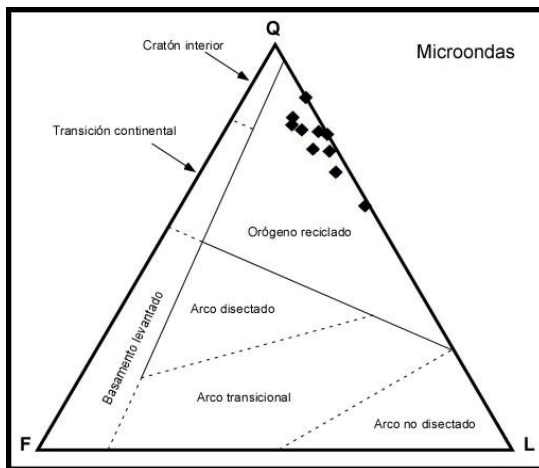
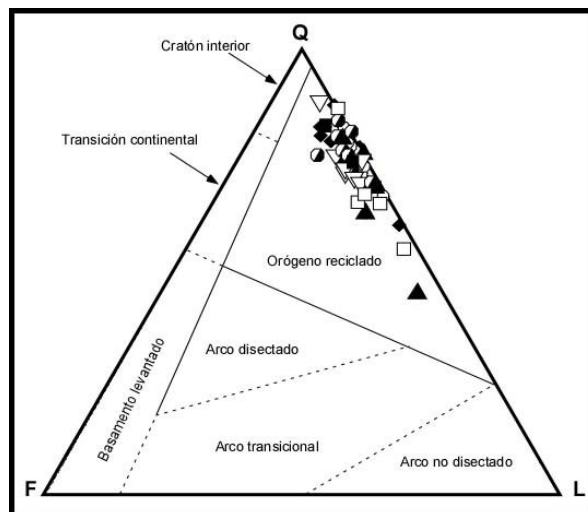
## A.1. Diagramas petrográficos

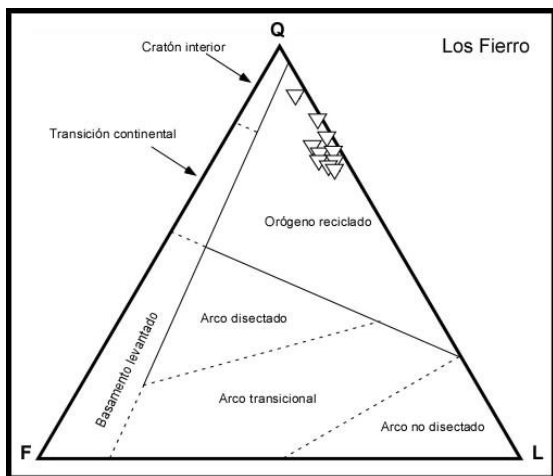
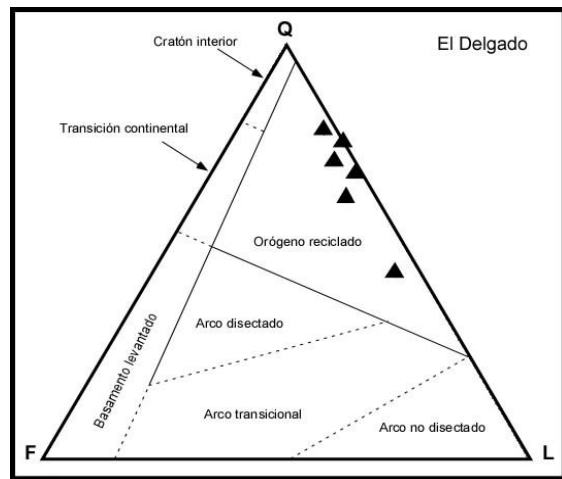
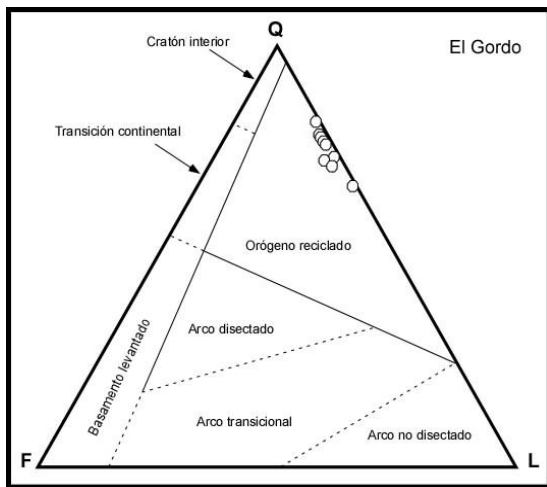
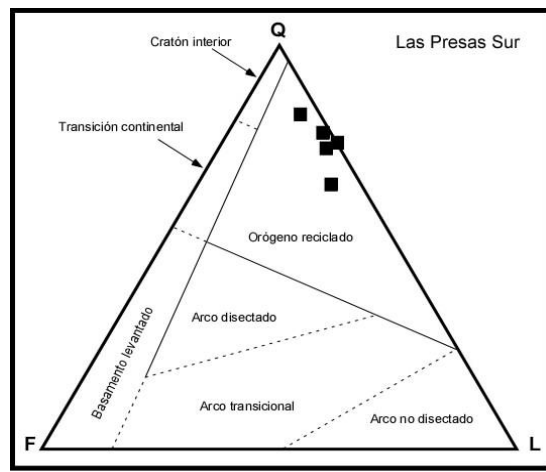
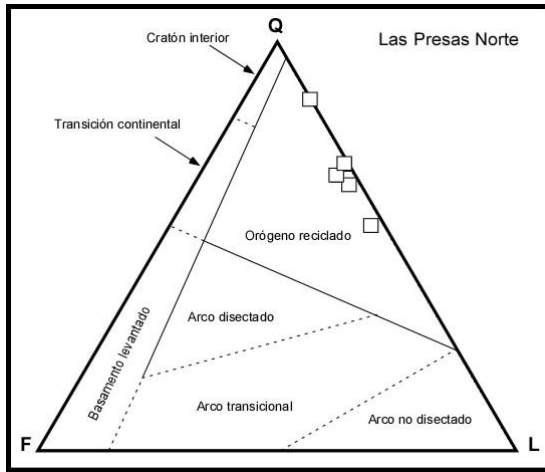
- A.1.1. Folk, 1980





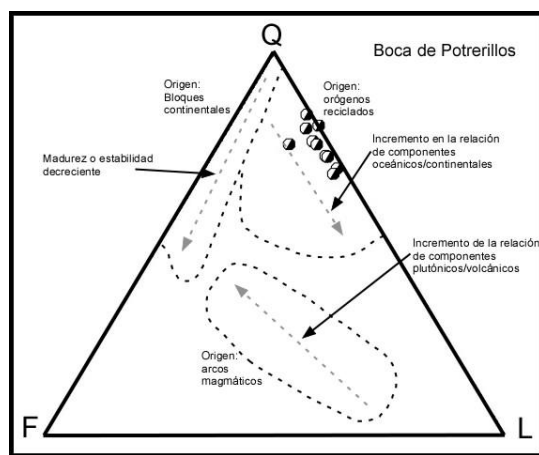
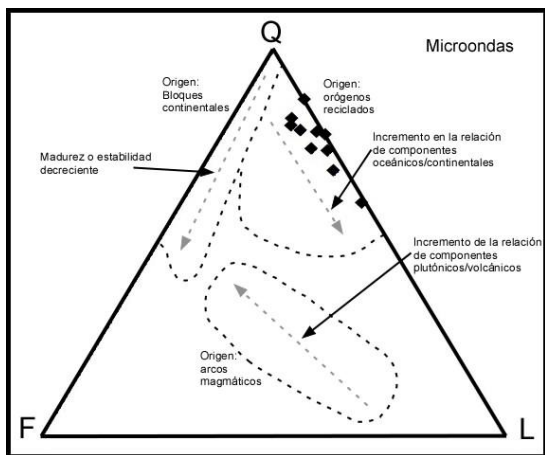
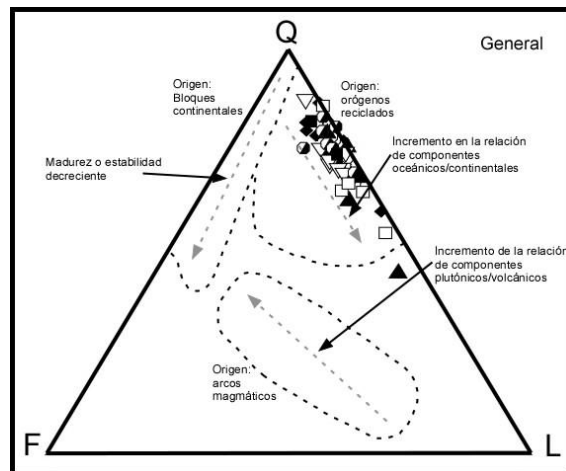
- A.1.2. Dickinson, 1983

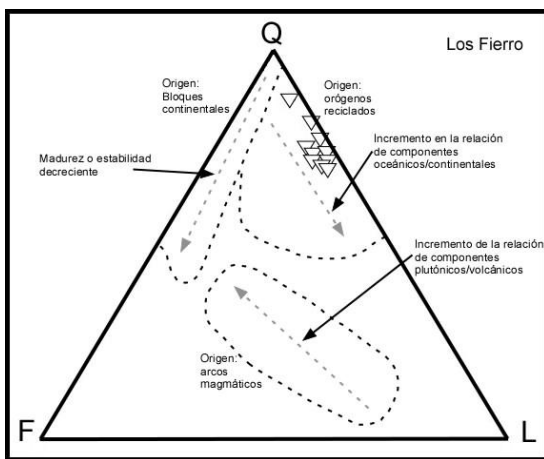
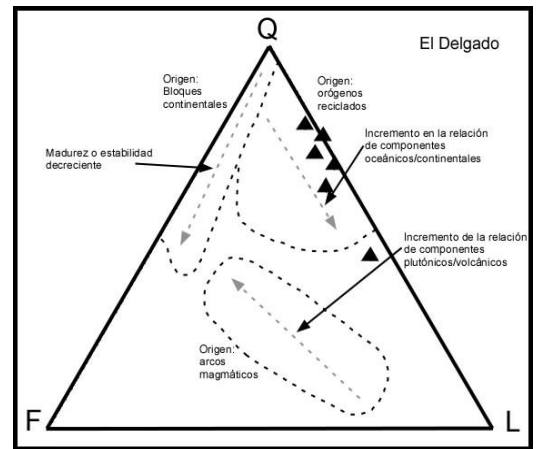
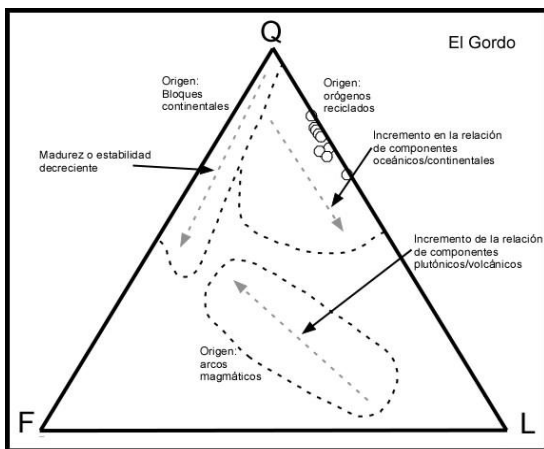
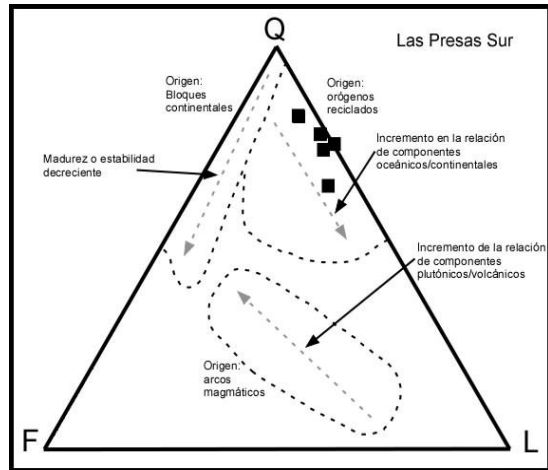
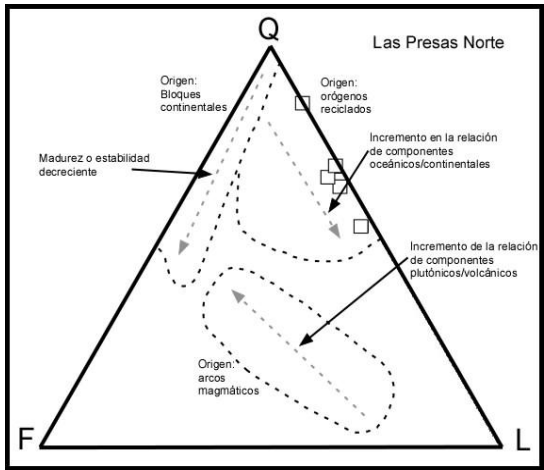




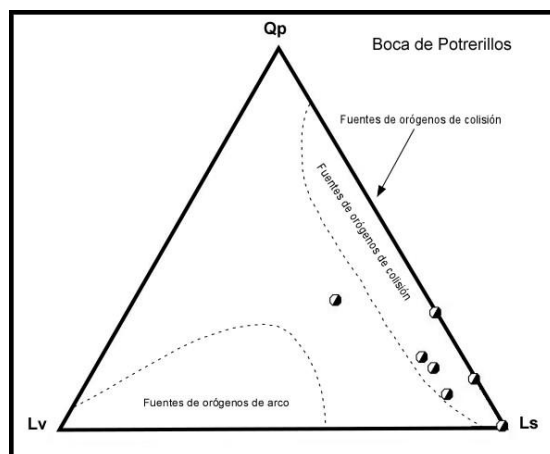
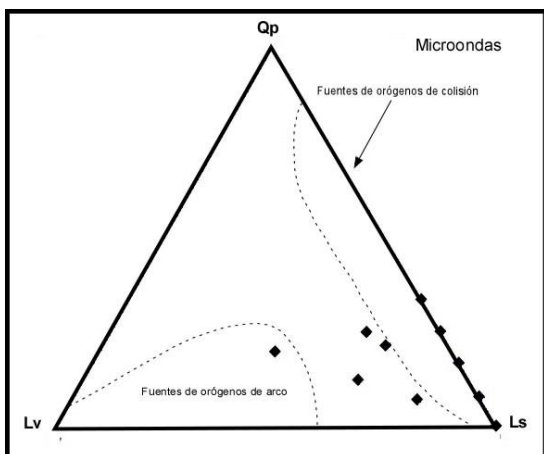
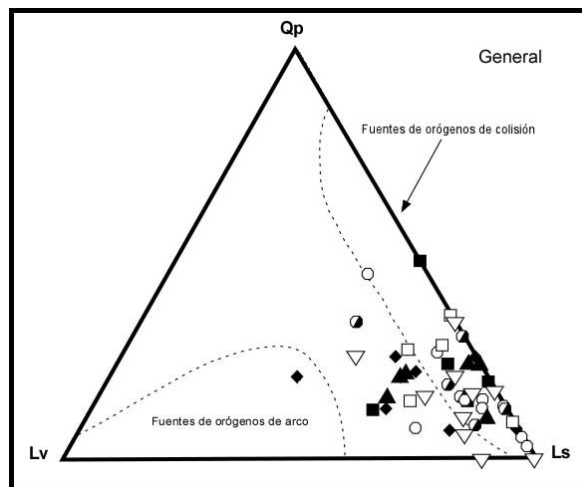


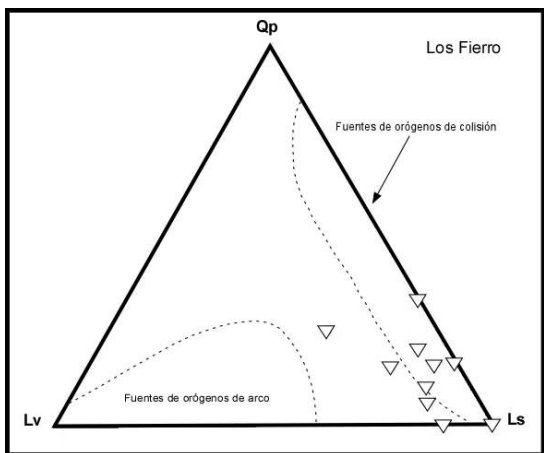
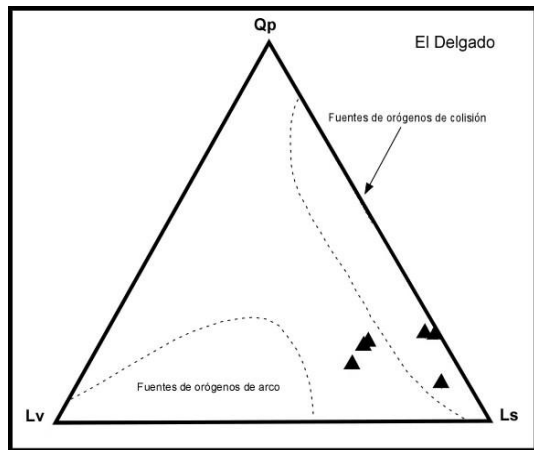
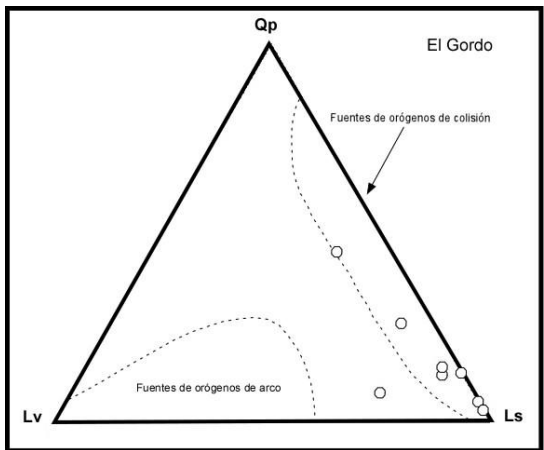
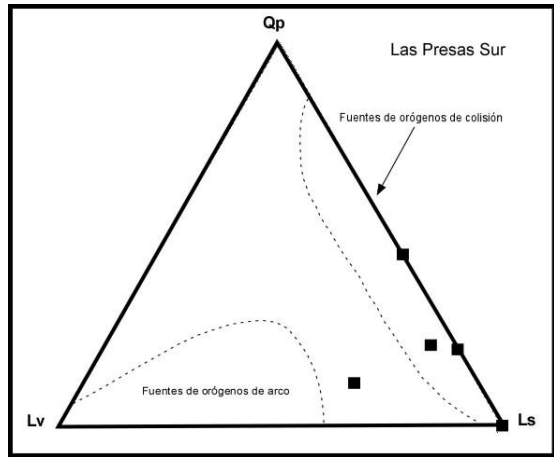
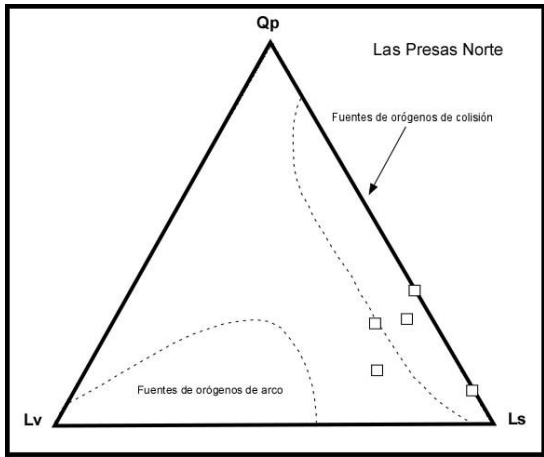
A.1.3. Dickinson y Suczek, 1979



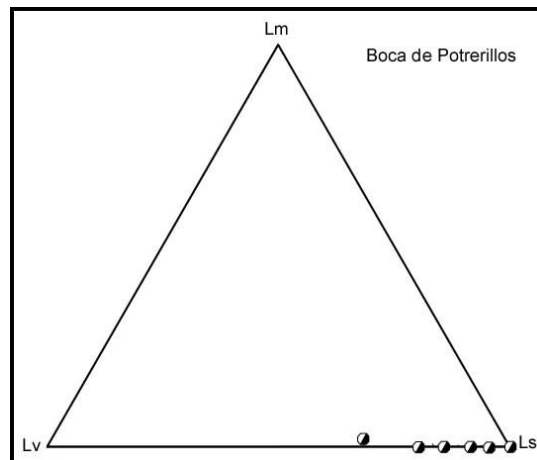
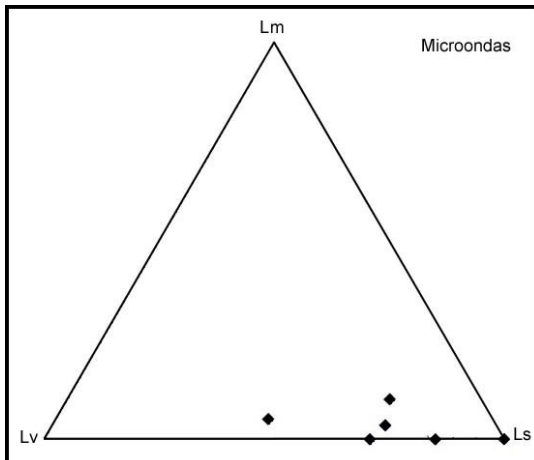
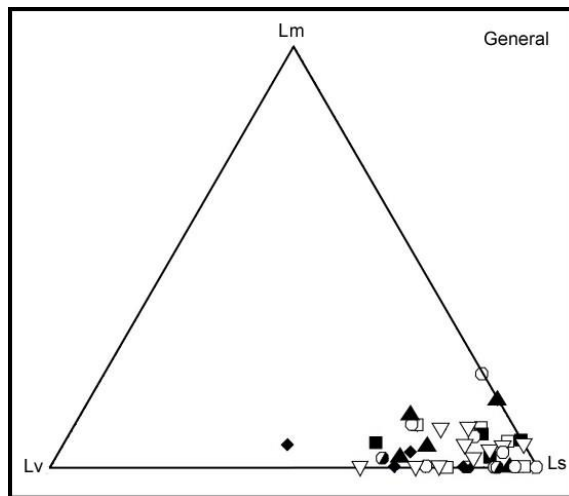


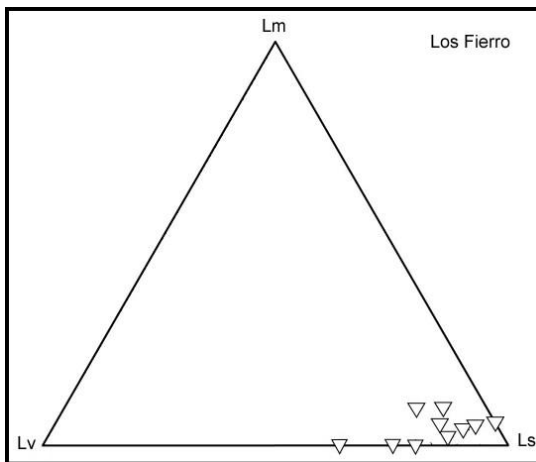
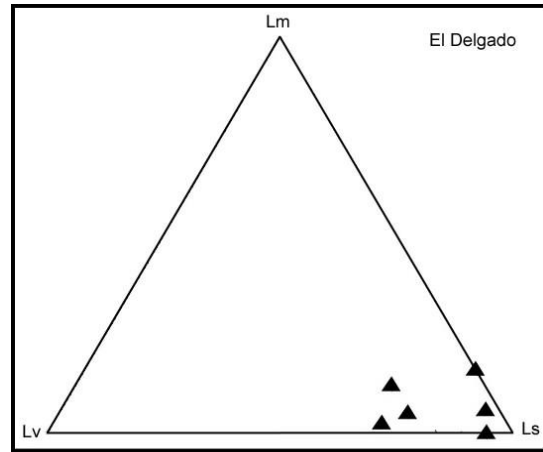
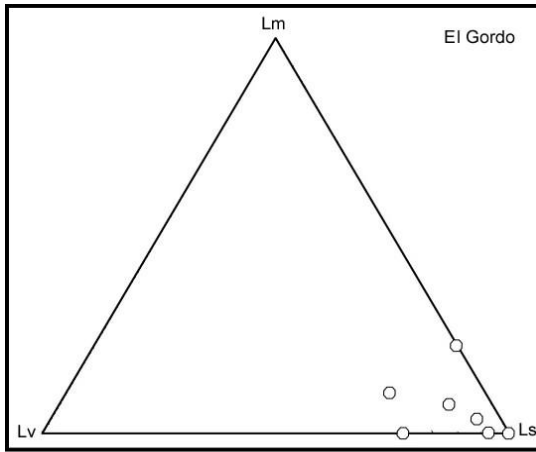
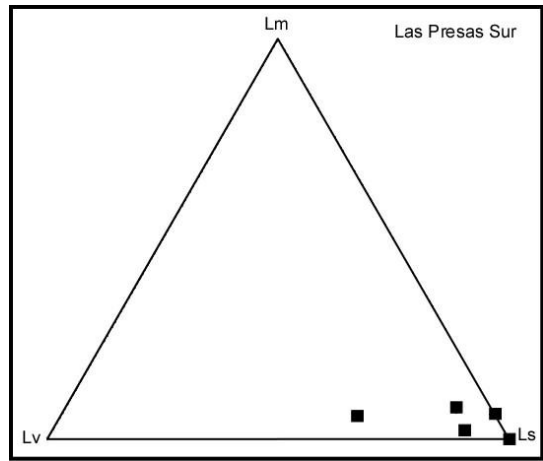
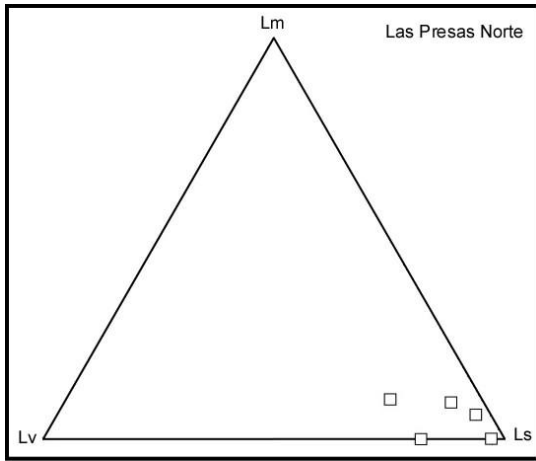
A.1.4. Dickinson y Suczek, 1979





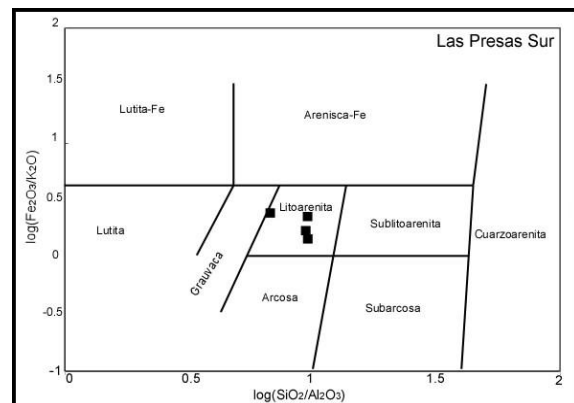
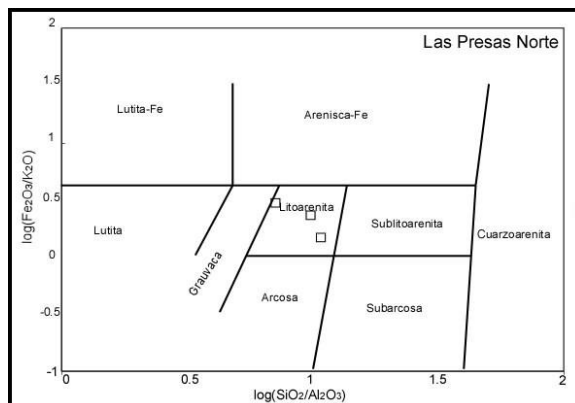
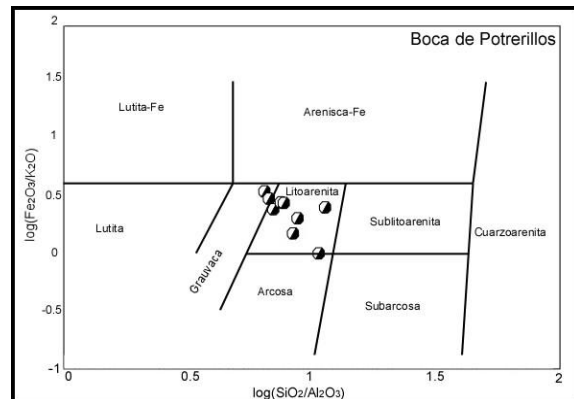
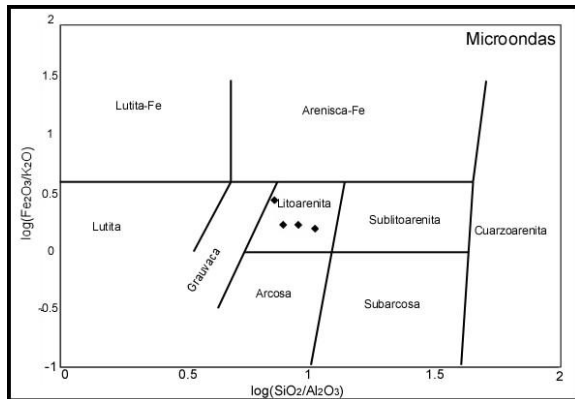
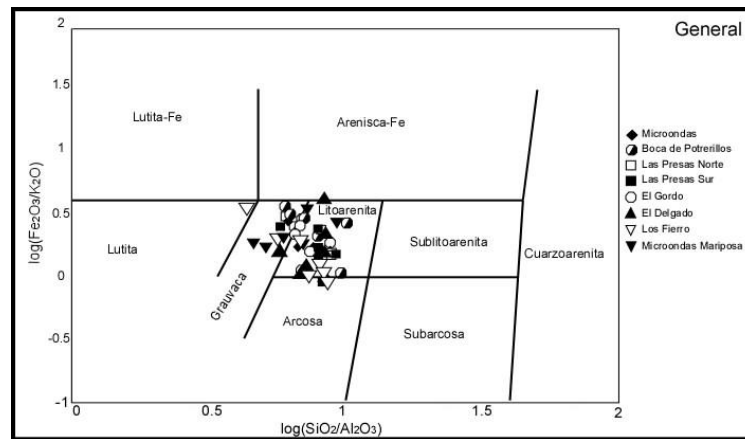
**A.1.5. Ingersoll y Suczek, 1979**

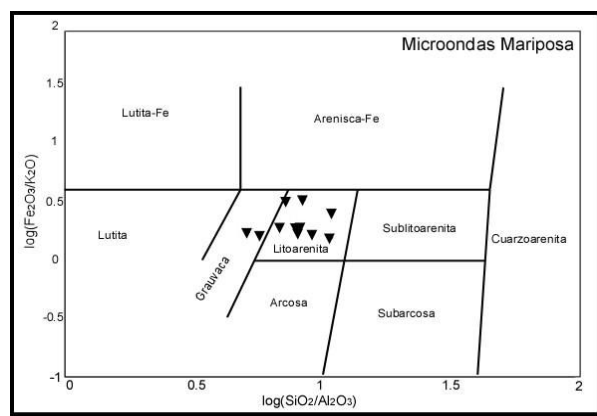
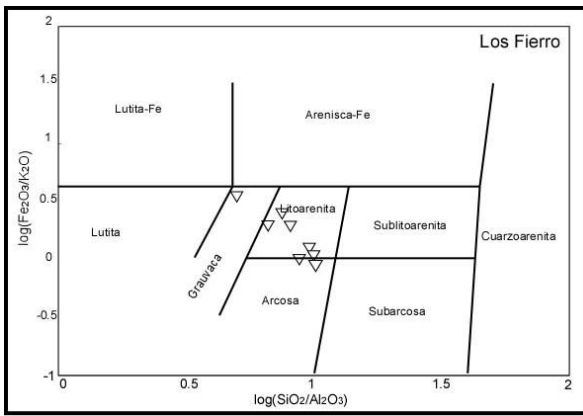
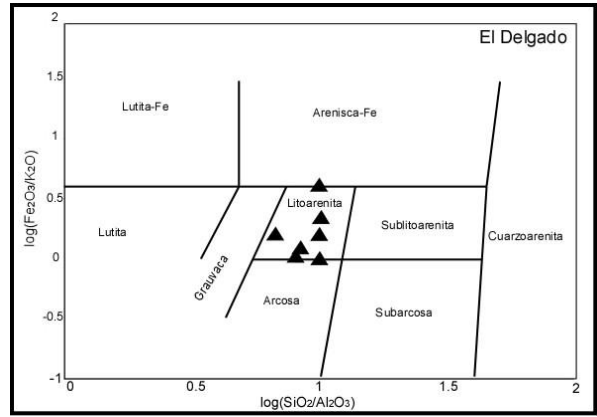
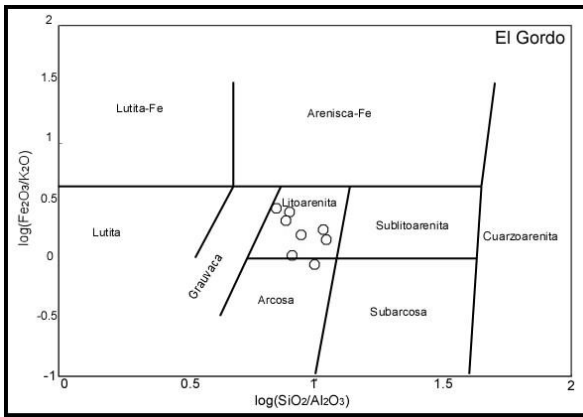




## A.2. Diagramas geoquímicos

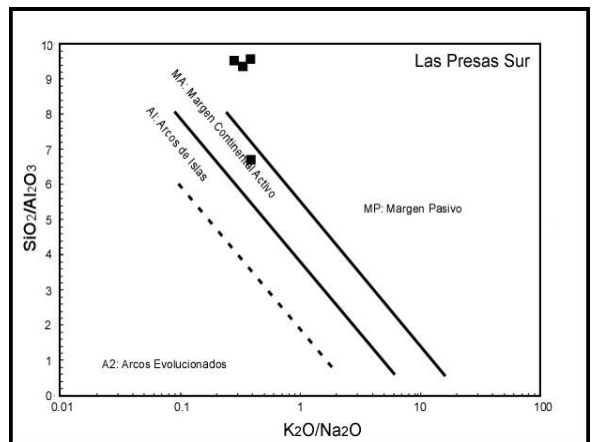
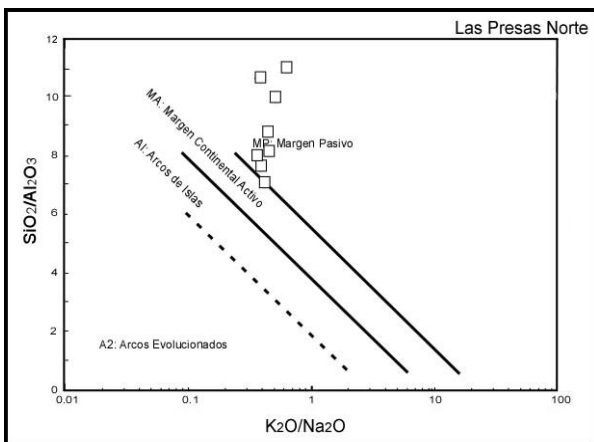
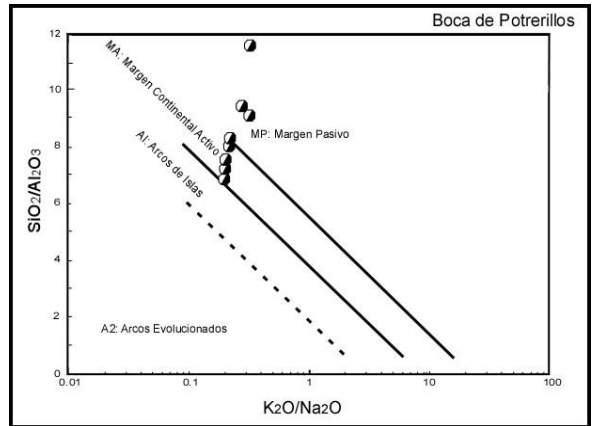
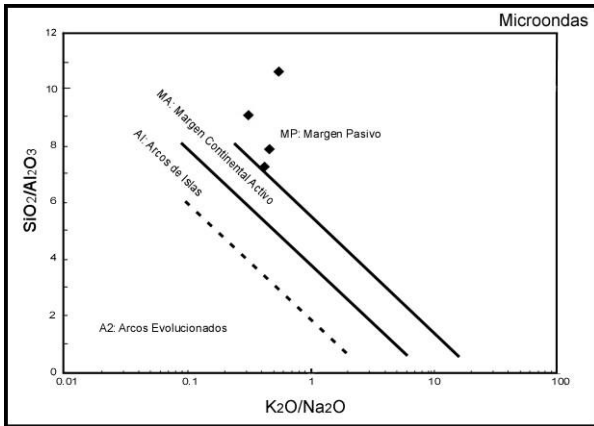
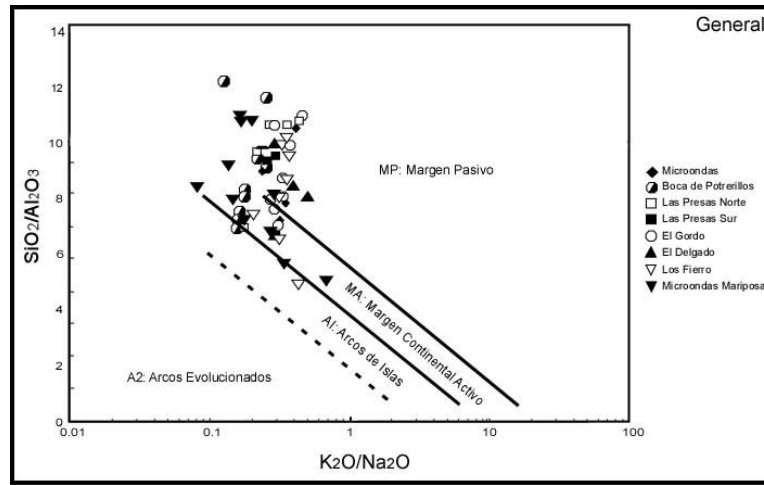
### A.2.1 Herron, 1988

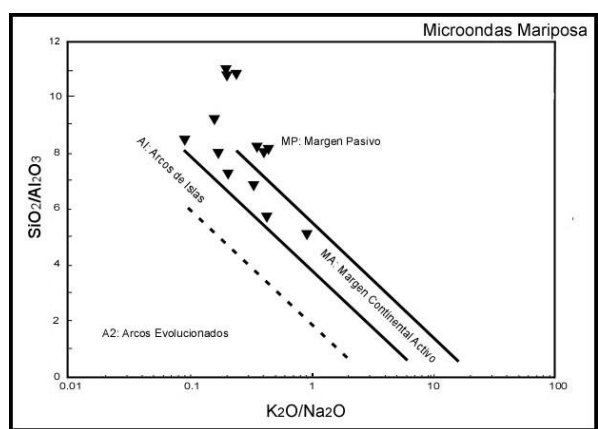
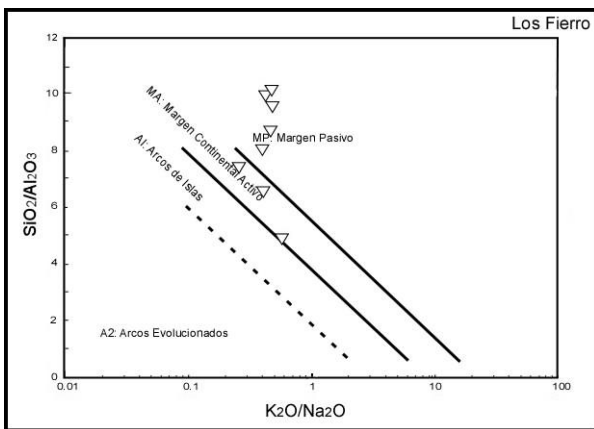
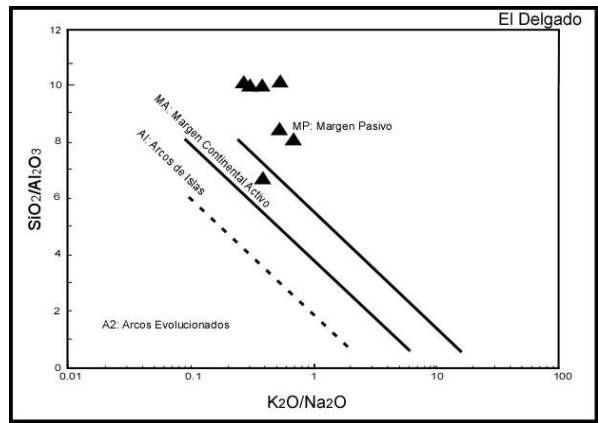
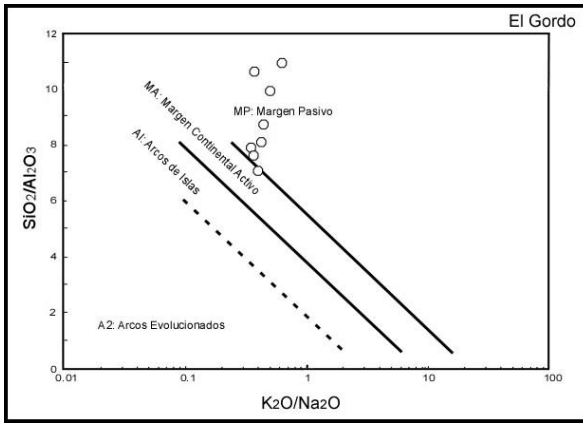




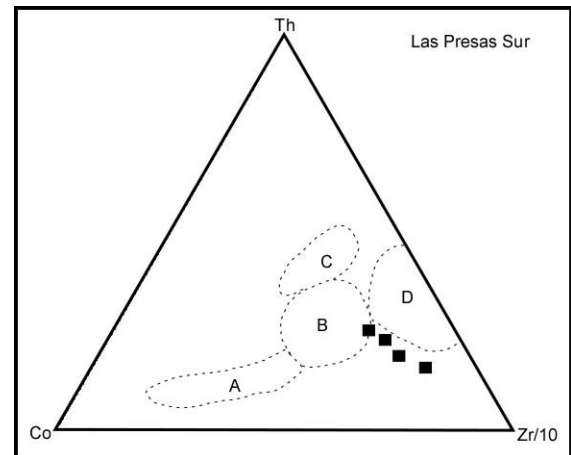
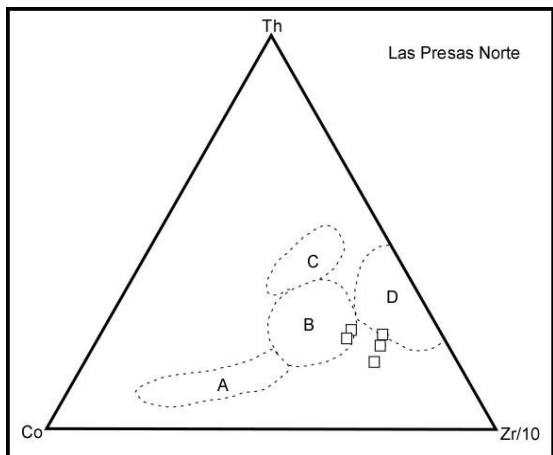
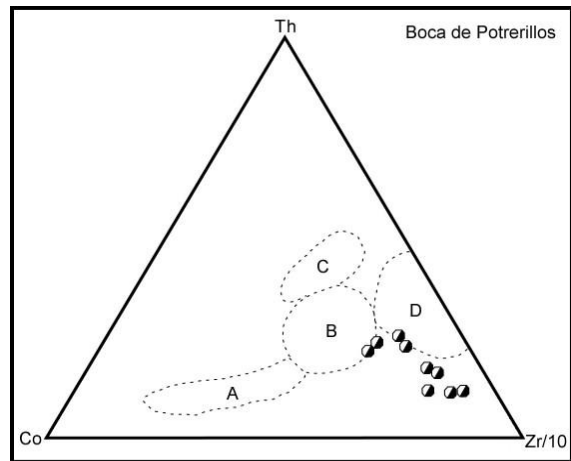
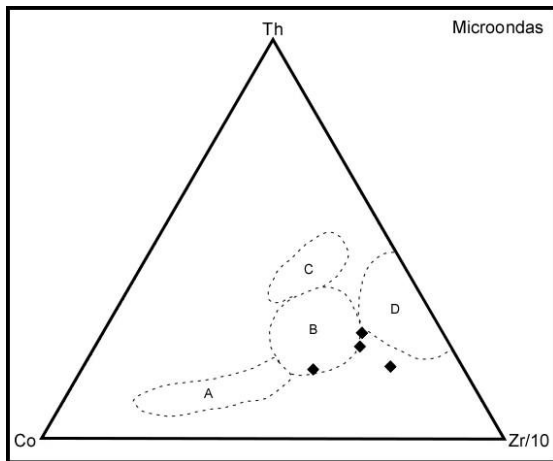
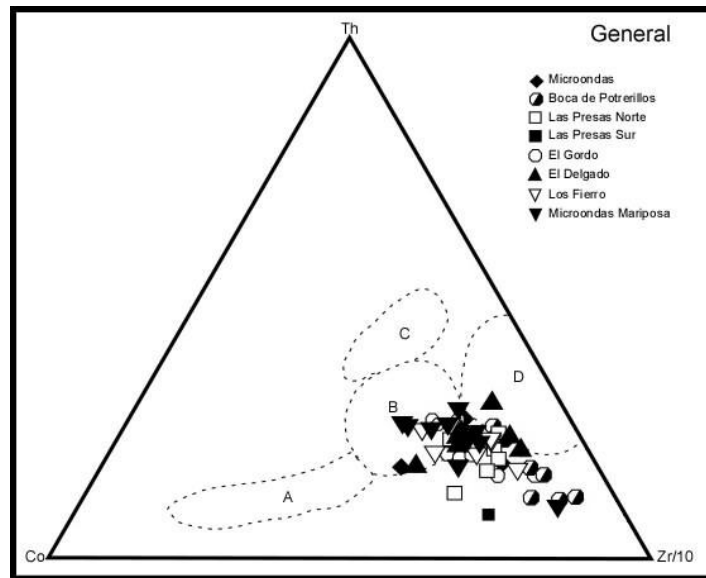


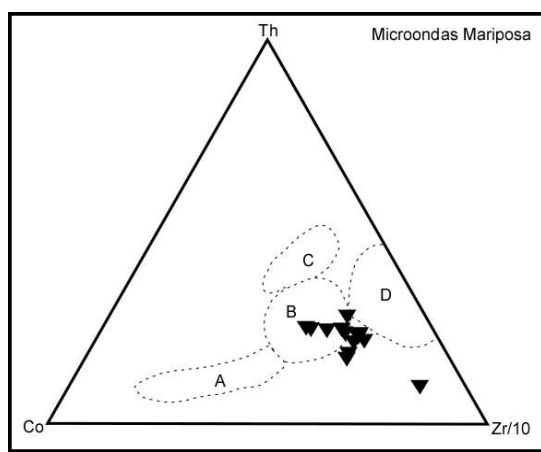
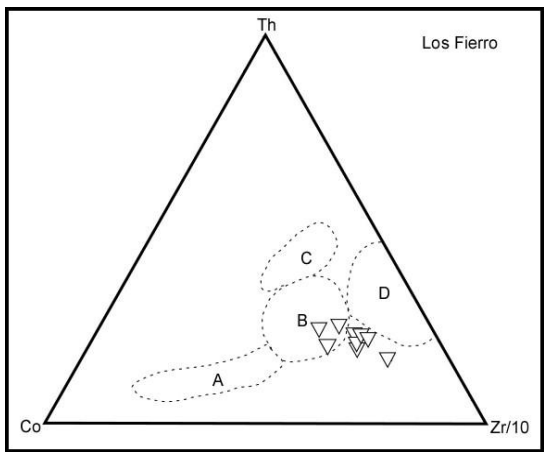
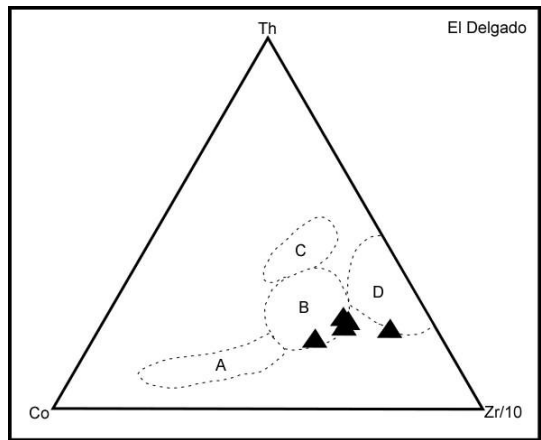
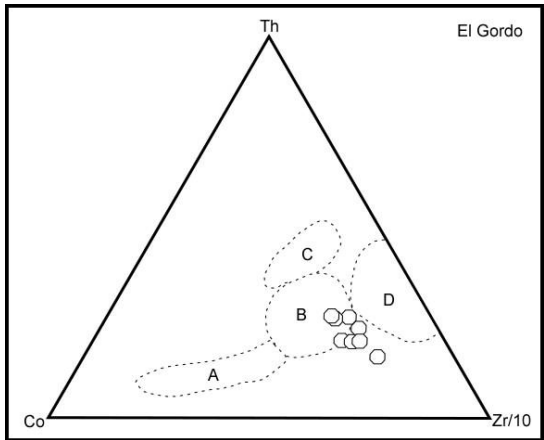
A.2.2. Roser y Korsch, 1986



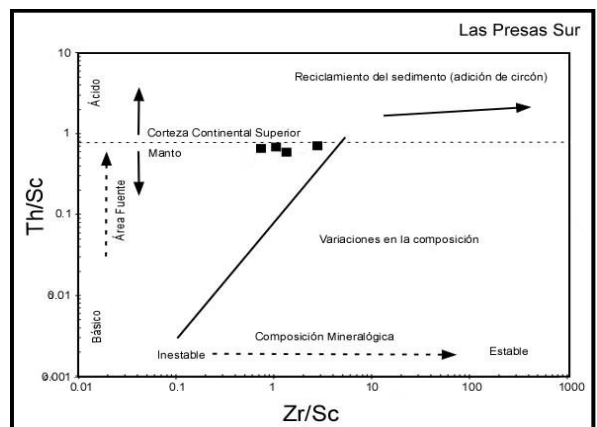
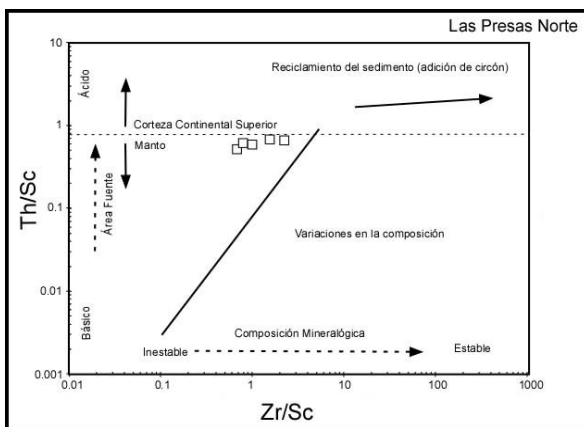
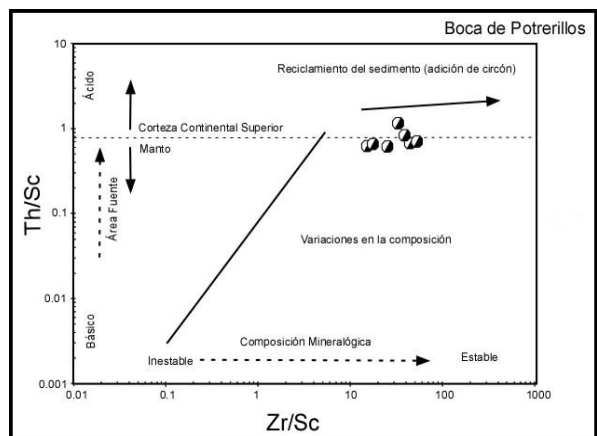
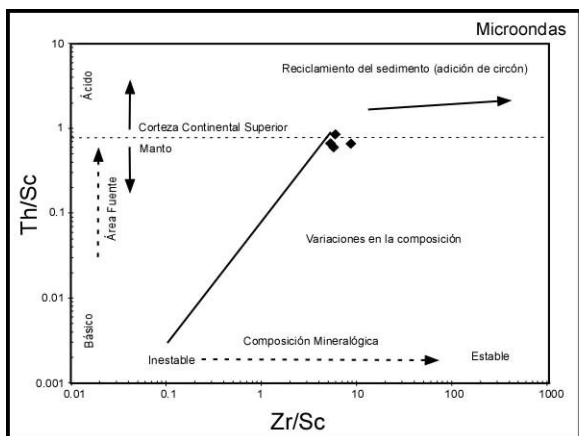
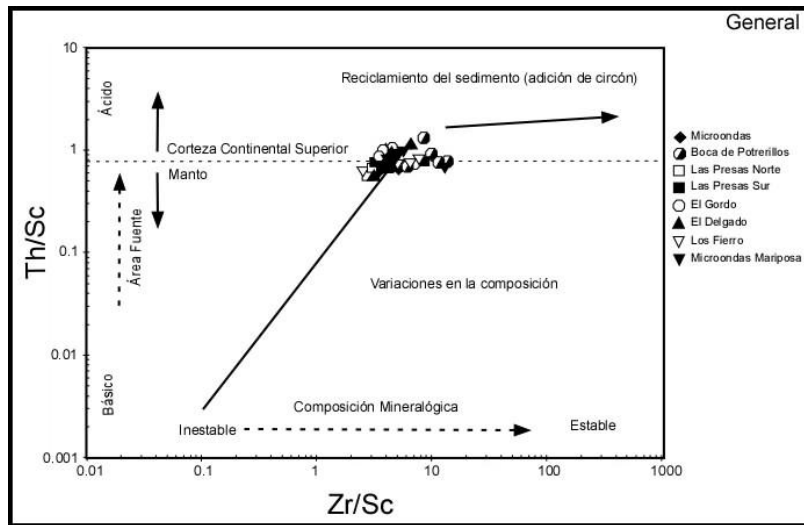


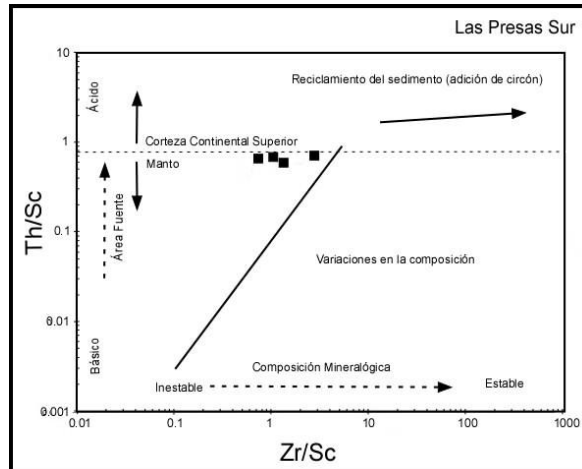
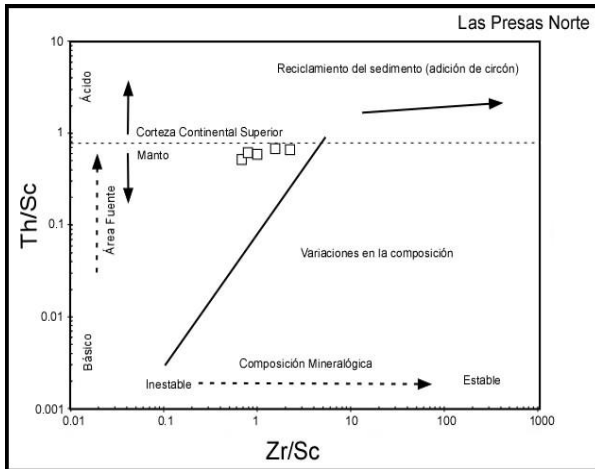
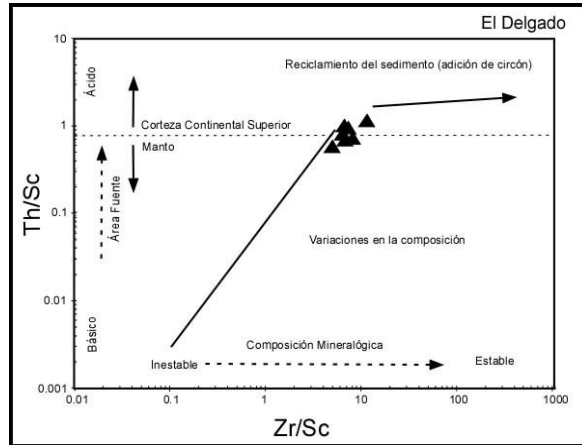
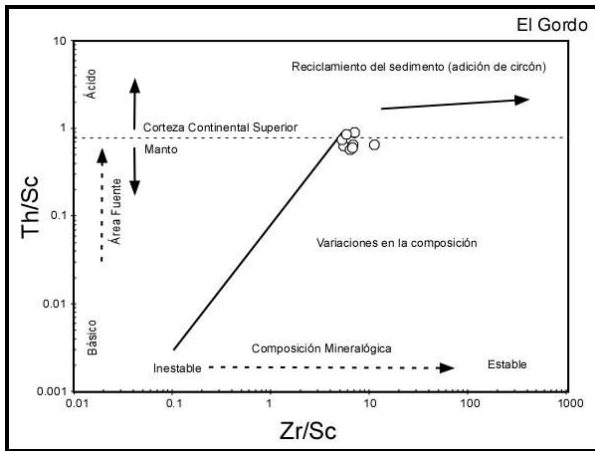
A.2.3. Bathia y Crook, 1986



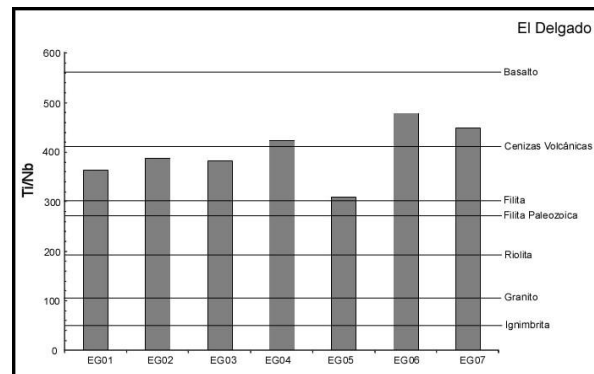
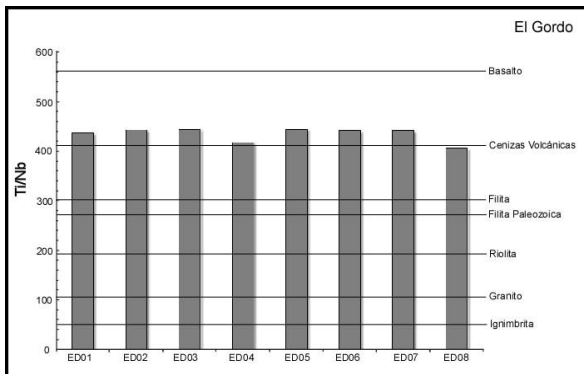
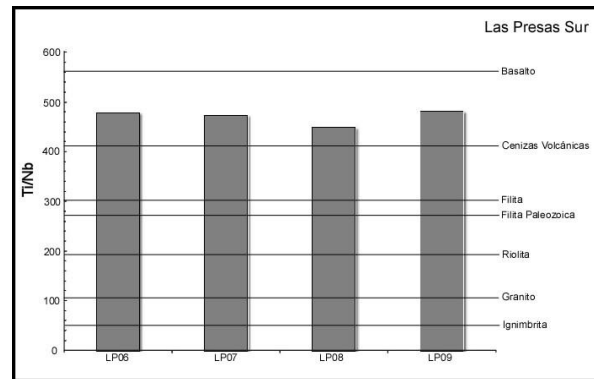
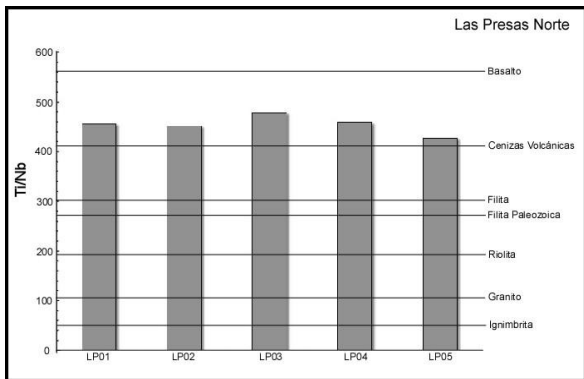
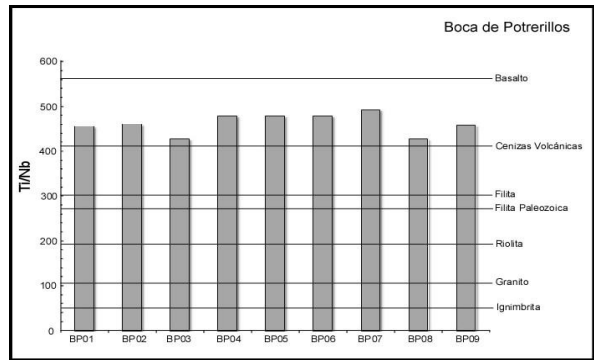
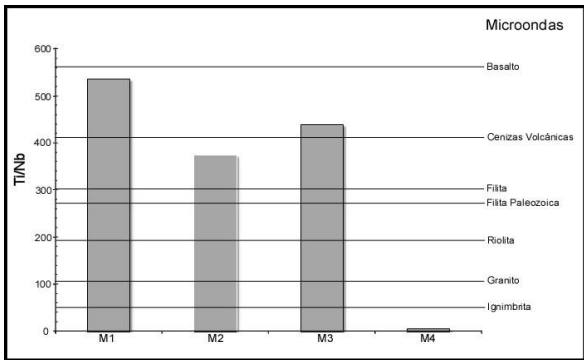
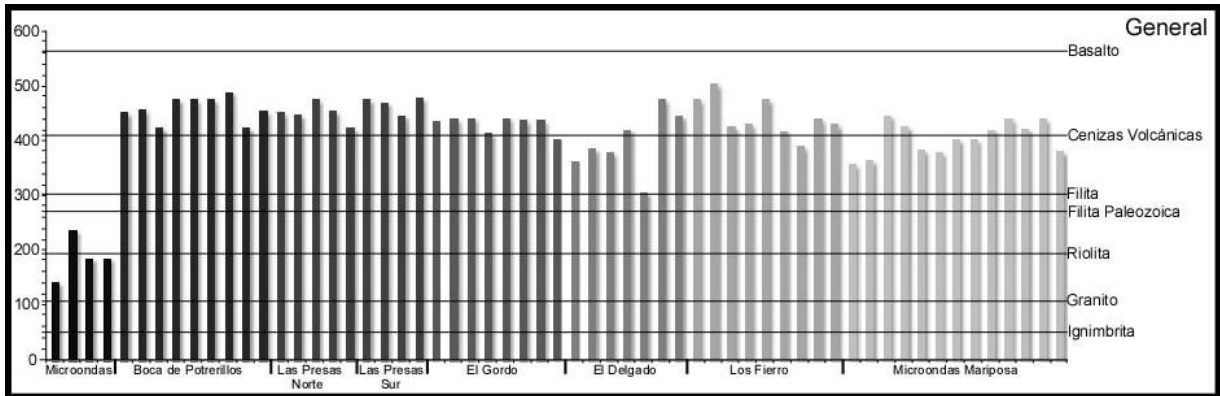


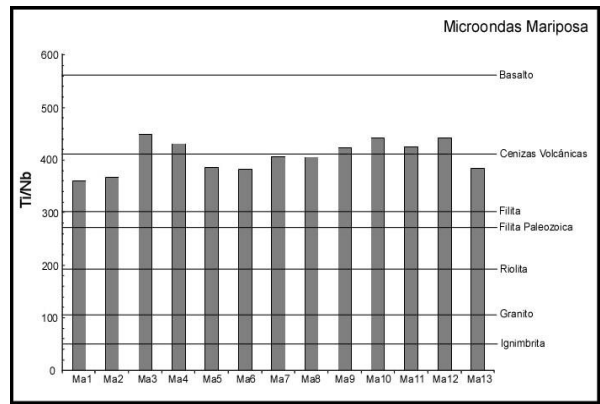
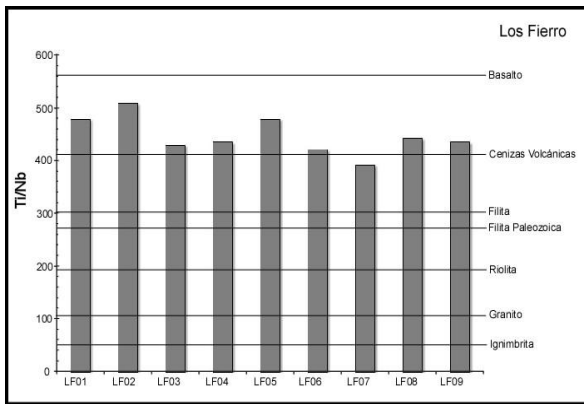
A.2.4. McLennan et al., 1993





A.2.5. Jenchen y Rosenfield, 2002







A.2.6. Taylor y McLennan, 1985

