



Análisis petrográfico y estadístico multivariado para discriminar las áreas fuente de la Formación La Casita del Jurásico Tardío-Cretácico Temprano y la Arcosa Patula del Cretácico Temprano en el Noreste de México

Yam Zul Ernesto Ocampo-Díaz^{1,*}

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis de Potosí, Av. Dr. Manuel Nava No. 8, Zona Universitaria, C.P., 78290.

* magonegro_2000@hotmail.com

Resumen

Durante el Jurásico Tardío-Cretácico Temprano, se depositaron gruesas secuencias clásticas en la cuenca de Sabinas y en la fosa de Monterrey. Dos ejemplos de estas secuencias son la Arcosa Patula, del Cretácico Temprano y la Formación La Casita del Jurásico Tardío-Cretácico Temprano, las cuales fueron analizadas petrográficamente y estadísticamente en este estudio.

La Arcosa Patula, una arenita feldespática ($Q_{54}F_{38}L_{8}$; a un nivel de confianza del 99 %), se depositó dentro de zonas de bloques continentales con tendencia a la transición continental ($Qm_{34}F_{41}L_{5}$; 99 %, de nivel de confianza). Las características petrográficas y las diferentes relaciones mineralógicas indicadoras de procedencia sugieren que las áreas fuente de la Arcosa Patula estuvieron compuestas predominantemente de rocas metamórficas de grado bajo (esquisto pelítico o samítico), granito o granodiorita, caliza y arenisca.

La Formación La Casita incluye arenita lítica y arenita feldespática ($Q_{52}F_{27}L_{21}$, con un nivel de confianza del 99 %) depositadas en un ambiente de arco disectado o de transición continental ($Qm_{52}F_{64}L_{14}$; con un nivel de confianza del 99 %). El análisis petrográfico de areniscas de la Formación la Casita dentro de la fosa de Monterrey indica una procedencia muy compleja que involucra rocas metamórficas de grado medio a alto, andesita, riolita, granito o granodiorita, caliza, arenisca y lutita.

Un análisis estadístico multivariado de componentes principales y la aplicación de diagramas binarios de índices petrográficos con una transformación logcociente centrada y aditiva (*alr* y *clr*), confirman la composición de las áreas fuente, sugiriendo que: i) la Arcosa Patula es más rica en líticos de bajo grado metamórfico, relacionados posiblemente con rocas de las montañas Ouachita a un 99 % de nivel de confianza y con los intrusivos graníticos o granodioríticos de edades pérmicas-triásicas; ii) la Formación La Casita tiene afinidad con arcos volcánicos del Paleozoico (arco de las Delicias), arcos del Pérmico-Triásico y del Jurásico Temprano y con rocas metamórficas de medio a alto grado, posiblemente pertenecientes al Complejo Novillo.

Palabras clave: Petrografía sedimentaria, procedencia, noreste de México, Cretácico Temprano, Formación La Casita, Arcosa Patula.

Abstract

During the Late Jurassic to Early Cretaceous, two large sedimentary basins in northeastern Mexico, the Sabinas basin and the Monterrey through, accumulated thick clastic sequences. Two examples of these clastic sequences are the Patula Arkose (Early Cretaceous) and La Casita Formation (Late Jurassic - Early Cretaceous), which were petrographically and statistically analyzed in this study.

The Patula Arkose, a feldspathic arenite ($Q_{54}F_{38}L_{8}$ -with a confidence level of the 99 %), was deposited into continental blocks with trends to continental transition ($Qm_{34}F_{41}L_{5}$, 99 % of the confidence level). The petrographic characteristics and the mineralogical relationships suggest that the source rocks of the Patula Arkose were mainly low-grade metamorphic rocks (pelitic or psammitic schists),

granite or granodiorite, limestone and sandstone.

La Casita Fomation is composed of lithic arenite and feldesphatic arenite ($Q_{32}F_{27}L_{21}$, with a confidence level of the 99 %) deposited in a dissected arc or a continental transition area ($Qm_{32}F_{64}L_{14}$, with a confidence level of the 99 %). The sandstone petrography of La Casita Formation in the Monterrey trough shows a very complex provenance that implicates medium to high grade metamorphic rocks, andesite, rhyolite, limestone, sandstone, and shale sources.

A multivariate statistical analysis of the main components, and the application of binary diagrams of petrographic index with additive and centered logratio transformation (alr and clr) confirmed the source rocks composition, suggesting that: i) the Patula Arkose is richer in low-grade metamorphic fragments, which are probably related with the Ouachita Mountains with 99 % of confidence level, and with granitic or granodioritic rocks of Permian-Triassic age; ii) La Casita Formation has affinity with the Paleozoic Las Delicias volcanic arc, Permian-Triassic and Early Jurassic arcs, and with medium to high grade metamorphic rocks that were possibly part of the Novillo Complex.

Keywords: Sedimentary petrography, provenance, northeastern Mexico, Early Cretaceous, La Casita Formation, Patula Arkose.

1. Introducción

La petrografía de rocas clásticas es una herramienta útil para determinar y discriminar la procedencia y composición de las áreas fuente de formaciones de edades similares (Arribas y Arribas, 1991), así como también permite obtener una aproximación de la ubicación y composición de las áreas fuente (Dickinson, 1970; Blatt *et al.*, 1972; Pettijohn *et al.*, 1987; Dickinson *et al.*, 1983). La composición final de las rocas siliciclásticas está influenciada y puede ser modificada por diversos factores: la composición del área fuente, la distancia de transporte, el relieve y morfología de la cuenca, el clima y por último la diagénesis que modifica y altera su composición final (Blatt, 1967; Suttner *et al.*, 1981; Ricci-Lucchi, 1985; Johnson, 1993; Cox y Lowe, 1995; Weltje *et al.*, 1998). En particular, diversos autores sugieren que la composición de las areniscas está relacionada con el ambiente tectónico donde fueron depositadas (Dickinson y Suczek, 1979; Dickinson *et al.*, 1983; Mack, 1984; Valloni, 1985).

Durante décadas los trabajos de petrografía de rocas siliciclásticas se han realizado predominantemente dentro de cuencas de tipo antepaís (*foreland*) (Hiscott, 1978; DeCelles y Hertel, 1989; Critelli y Le Pera, 1995; Critelli, 1999, por mencionar algunos) y sólo pocos estudios han documentado las características petrográficas y diagenéticas de cuencas de tipo *rift* o sistemas *pull-apart* (Zuffa *et al.*, 1980; Marsaglia, 1991; Garzanti *et al.*, 2001; Critelli *et al.*, 2002; Arribas *et al.*, 2003; Garzanti *et al.*, 2003; González-Acebrón *et al.*, 2007; Arribas *et al.*, 2007).

Desde la década de 1980 se ha propuesto que la cuenca de Sabinas y la fosa de Monterrey tuvieron conexión y sedimentos de procedencias similares (Eguiluz de Antuñano, 1990; Goldhammer, 1999). El presente trabajo contribuye al conocimiento de la evolución petrográfica de las cuencas relacionadas a procesos extensivos (*rift*) y transformantes o transcurrentes, y en consecuencia relacionadas a movimientos de desplazamiento lateral o del tipo que favorecen el desarrollo de cuencas de tipo de desplazamiento

a rumbo (*strike-slip*) y *pull-apart* (Ocampo-Díaz, 2012).

El presente estudio incluye un análisis petrográfico con conteo de puntos de alta densidad (~ 1000 puntos/lámina delgada) y un análisis estadístico multivariado de los componentes principales. Estos análisis documentan las características petrográficas y discriminan la composición de las áreas fuente de dos formaciones del Cretácico Temprano que afloran dentro de la cuenca de Sabinas y la fosa de Monterrey.

2. Marco Geológico

El noreste de México es la extensión nororiental del sistema Cordillerano del oeste de Norteamérica, generado por acreción de diversos arcos continentales y oceánicos emplazados dentro del basamento cristalino (corteza continental) con afinidades con Gondwana y Lawrencia (terrenos Sierra Madre y Coahuila, respectivamente; Devónico -Silúrico; Pérmico-Triásico; Triásico-Jurásico Temprano; *cf.* Campa y Coney, 1983), que fueron desplazados por sistemas extensionales y de desplazamiento lateral durante el Jurásico Tardío-Cretácico Temprano. Durante este último lapso se depositó una gruesa secuencia sedimentaria, característica de bordes continentales estables, relacionada con la apertura del Golfo de México, y que cubrió a las secuencias de los arcos subyacentes (Anderson y Silver, 1979, 1981; Pindell y Dewey, 1982; Campa y Coney, 1983; Coney, 1983; Jones *et al.*, 1984; McKee *et al.*, 1984, 1988, 1990, 1999; Patchett y Ruiz, 1987; Salvador, 1987; Wilson, 1990; Marton y Buffler, 1994; Barboza-Gudiño *et al.*, 1998, 1999; Lehmann *et al.*, 1999; Goldhammer y Johnson, 2001; Pindell y Kennan, 2002; Keppie, 2004; Murillo-Muñetón y Dorobek, 2003; Barboza-Gudiño *et al.*, 2008). Durante la apertura del Golfo de México, se desarrollaron grandes cuencas sedimentarias, relacionadas con márgenes pasivos (*syn-rift*, *rift* y *post-rift*) y con movimientos de desplazamiento lateral (cuenca Bisbee, fosa de Chihuahua, cuenca de Sabinas y fosa de Monterrey

(Marton y Buffler, 1994; Pindell y Kennan, 2002; Bassett y Busby, 2005; Haeggi y Muehlberger, 2005). Dentro del mismo lapso, Jurásico Tardío-Cretácico Temprano, en el noreste de México se depositaron secuencias evaporíticas, carbonatos de perimarea, secuencias clásticas que crecieron progresivamente de sistemas deltaicos, aluviales, fluviales y marinos marginales a una plataforma abierta (Charleston, 1973; Michalzik, 1988; Michalzik y Schumann, 1994; Eguiluz de Antuñano, 1990; Goldhammer, 1999). Estas secuencias posteriormente fueron cubiertas por depósitos arrecifales que cambian lateral y verticalmente a sedimentos lagunares y post-arrecifales (Wilson, 1990; Lehmann *et al.*, 1999; Murillo-Muñetón y Dorobek, 2003). En el Cretácico Tardío-Paleógeno, las secuencias estratigráficas del noreste de México fueron deformadas, cabalgadas y desplazadas por la orogenia Laramide, generando lo que actualmente se

conoce como la Sierra Madre Oriental o Cinturón Mexicano de Pliegues y Cabalgaduras (Campa, 1985; Chávez-Cabello *et al.*, 2004).

2.1. Basamentos y su cubierta sedimentaria

Las áreas de estudio se localizan en el límite de dos terrenos tectonoestratigráficos: el terreno Sierra Madre y el terreno Coahuila (Campa y Coney, 1983; Figura 1), o bien en el límite entre dos cuencas: la fosa Monterrey y la cuenca de Sabinas (Figura 1), que presentan basamentos con características distintas. El basamento del terreno Coahuila está conformado por rocas volcánicas calcialcalinas, rocas metamórficas de bajo grado, con una cubierta sedimentaria de depósitos volcanoclásticos tipo *flysch* y rocas sedimentarias clásticas y carbonatadas de edades

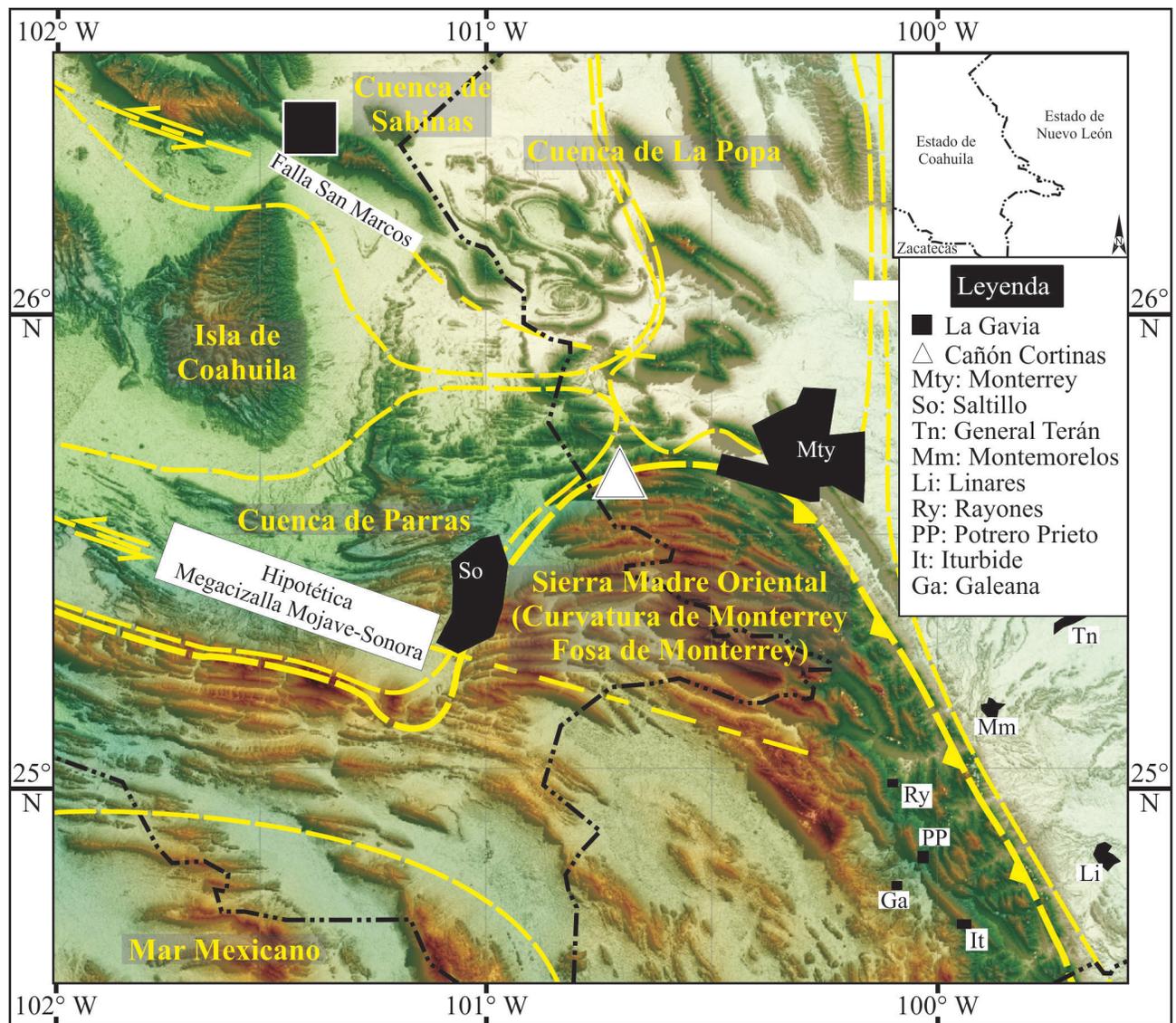


Figura 1. Localización de las áreas de estudio, mostrando la distribución de las cuencas y elementos tectónicos en el noreste de México (modelo de elevación tomado de Masuch-Oesterreich, 2007)

que varían del Pensilvánico Tardío al Pérmico (Campa y Coney, 1983; McKee *et al.*, 1988; Jones *et al.*, 1995; Keppie, 2004). El terreno Sierra Madre tiene como basamento rocas metamórficas del Precámbrico (~ 1 Ga, Gneiss Novillo), que están cubiertas por esquistos pelíticos y samíticos con lentes de serpentinita, metagabro, metabasalto y metapedernal de la Formación Granjeno (Carrillo-Bravo, 1961; Campa y Coney, 1983; Dowe, 2004; Keppie, 2004). La cubierta sedimentaria del Gneiss Novillo y del Esquisto Granjeno, está conformada por secuencias de conglomerado de caliza con abundantes braquiópodos y equinodermos, toba riolítica y turbiditas del Silúrico-Devónico (Carrillo-Bravo, 1961; Gursky y Michalzik, 1989). Las rocas precámbricas y paleozoicas en ambos terrenos fueron intrusionadas por granito y granodiorita del Pérmico-Triásico, en los elementos paleogeográficos conocidos como isla La Mula y el archipiélago de Tamaulipas (Campa y Coney, 1983; Jones *et al.*, 1984; McKee *et al.*, 1988; Pindell y Kennan, 2002; Keppie, 2004).

2.2. Triásico-Cretácico Temprano

Durante el Triásico-Jurásico Temprano se depositaron gruesas secuencias clásticas dentro de ambientes fluviales, aluviales y lacustres, que fueron intrusionadas por diques y mantos (*sills*) de composiciones variables, generados por procesos de extensión dentro de una cuenca de tipo tras-arco o bien durante una etapa de *rift* intracontinental relacionada con la apertura del Golfo de México (Formación Huizachal; Michalzik, 1988, 1991; Barboza-Gudiño *et al.*, 1998; 1999; Goldhammer, 1999; Barboza-Gudiño *et al.*, 2008). Las secuencias de la Formación Huizachal, están cubiertas por depósitos de conglomerado, arenisca y lutita, los cuales fueron depositados dentro de cuencas de tipo *pull-apart*, asociadas al desplazamiento del bloque de Yucatán (Salvador, 1991; Pindell y Kennan, 2002).

El Jurásico Medio-Cretácico Temprano está caracterizado por una subducción oblicua que favoreció el desarrollo de fallamiento lateral izquierdo y sistemas transtensivos, generando cuencas de tipo intra-cratónicas y *pull-apart*, y posiblemente la apertura del Golfo de México (Michalzik, 1988; Bassett y Busby, 2005; Haenggi y Muehlberger, 2005; Ocampo-Díaz, 2007 y Ocampo-Díaz *et al.*, 2008). En este lapso, en las inmediaciones de los altos de basamentos se depositaron grandes secuencias evaporíticas, carbonatadas y siliciclásticas en ambientes aluviales, fluviales y costeros. Estos depósitos cambian lateralmente a sedimentos depositados en ambientes de rampa externa y playa. Cubriendo a estos depósitos, se depositaron grandes secuencias siliciclásticas en ambientes deltaicos, costeros, aluviales y fluviales del Jurásico Tardío-Cretácico Temprano (formaciones La Casita, Barril Viejo, Arcosa Patula, Miembro Arenoso Galeana de la Formación Taraises y Formación San Marcos; Figura 2).

Las formaciones estudiadas en el presente trabajo son el Miembro San Pablo de la Formación la Casita y la Arcosa

Patula cuya descripción general se presenta a continuación.

2.2.1. Formación La Casita

La Formación La Casita, definida por Imlay (1936), está constituida por lutita gris oscura a negra, interestratificada con estratos delgados de caliza arcillosa, arenisca calcárea y horizontes fosfatados. El espesor de la Formación La Casita oscila entre 60 y 800 m, lo que está relacionado con la distancia entre el sitio de depósito y el área fuente, posiblemente la isla de Coahuila (Fortunato, 1982; Fortunato y Ward, 1987; Michalzik, 1988; Michalzik y Schumann, 1994). En la región de Monterrey-Saltillo, la Formación La Casita ha sido subdividida en dos unidades estratigráficas (Humphrey, 1954; Vokes, 1963). La unidad inferior, el Miembro La Muralla tiene un espesor aproximado de 330 m, y consiste en lutita calcárea negra y lutita arenosa café oscura. La unidad superior, el Miembro San Pablo (objeto del presente trabajo), está compuesto por 340 m de espesor de conglomerado, arenisca de grano grueso a fino y lutita, que generalmente se adelgazan hacia la cima. El conglomerado presenta estratificación mediana a gruesa, variando de moderadamente a bien clasificado, exhibe gradación normal, estratificación cruzada plana y/o tangencial y sus contactos generalmente son erosivos. La arenisca varía de grano fino a grueso, presenta estratificación cruzada plana y laminaciones paralelas. Localmente la arenisca muestra concentraciones de ostras, algas o corales, así como también icnofósiles (*Skolithos*, *Thalassinoides* y *Ophiomorfa*). Los estratos de lutita son los más gruesos en el Miembro San Pablo y se caracterizan por presentar laminación paralela, estratificación lenticular y de tipo *flaser*. El Miembro San Pablo sobreyace en contacto erosivo al Miembro La Muralla y subyace en contacto transicional al Miembro Nogales de la Formación Taraises. La distribución de facies de la Formación La Casita en el área de Saltillo-Monterrey ha sido interpretada como el crecimiento progresivo de un extenso complejo de abanico deltaico que tuvo su origen en la Isla de Coahuila (Fortunato y Ward, 1987; Michalzik, 1988; Michalzik y Schumann, 1994; Figura 2 y 3b).

La edad de la Formación La Casita ha sido asignada al Kimmeridgiano temprano al Valanginiano temprano por la presencia de *Ataxioceras* sp., *Idoceras* spp., *Spiticeras* sp., *Berriasella* sp., *Dictoloceras* sp., *Neocomites* sp., *Olcostephanus* sp., *Lyticoceras* sp., y *Leopoldoa* sp. (Fortunato y Ward, 1987; Michalzik y Schumann, 1994).

2.2.2. Arcosa Patula

La Arcosa Patula, definida por Imlay (1940) en la sierra de La Gavia, está constituida por 1210 m de lutita, arenisca, conglomerado y algunos estratos de brecha con espesores variables. El conglomerado y la brecha están soportados por matriz y clastos, muestran estratificación mediana a gruesa, con gradación normal y estratificación cruzada plana. Los clastos son redondeados a subangulosos, siendo principalmente de rocas metamórficas de grado

bajo, granito, caliza, arenisca y lutita. Los estratos de arenisca van de grano fino a grueso, con gradación normal e inversa, laminación paralela, estratificación cruzada plana y tangencial, así como rizaduras escalonadas dentro de estratos con estratificación delgada a mediana. Los contactos son generalmente planos y ocasionalmente erosivos. Los

estratos de lutita varían de espesor mediano (~ 30 cm) a muy gruesos (> 1m), son de color gris oscuro y exhiben laminación paralela.

La Arcosa Patula ha sido interpretada como depósitos aluviales-fluviales procedentes de la Isla de Coahuila. Esta formación es cronoestratigráficamente correlacionable

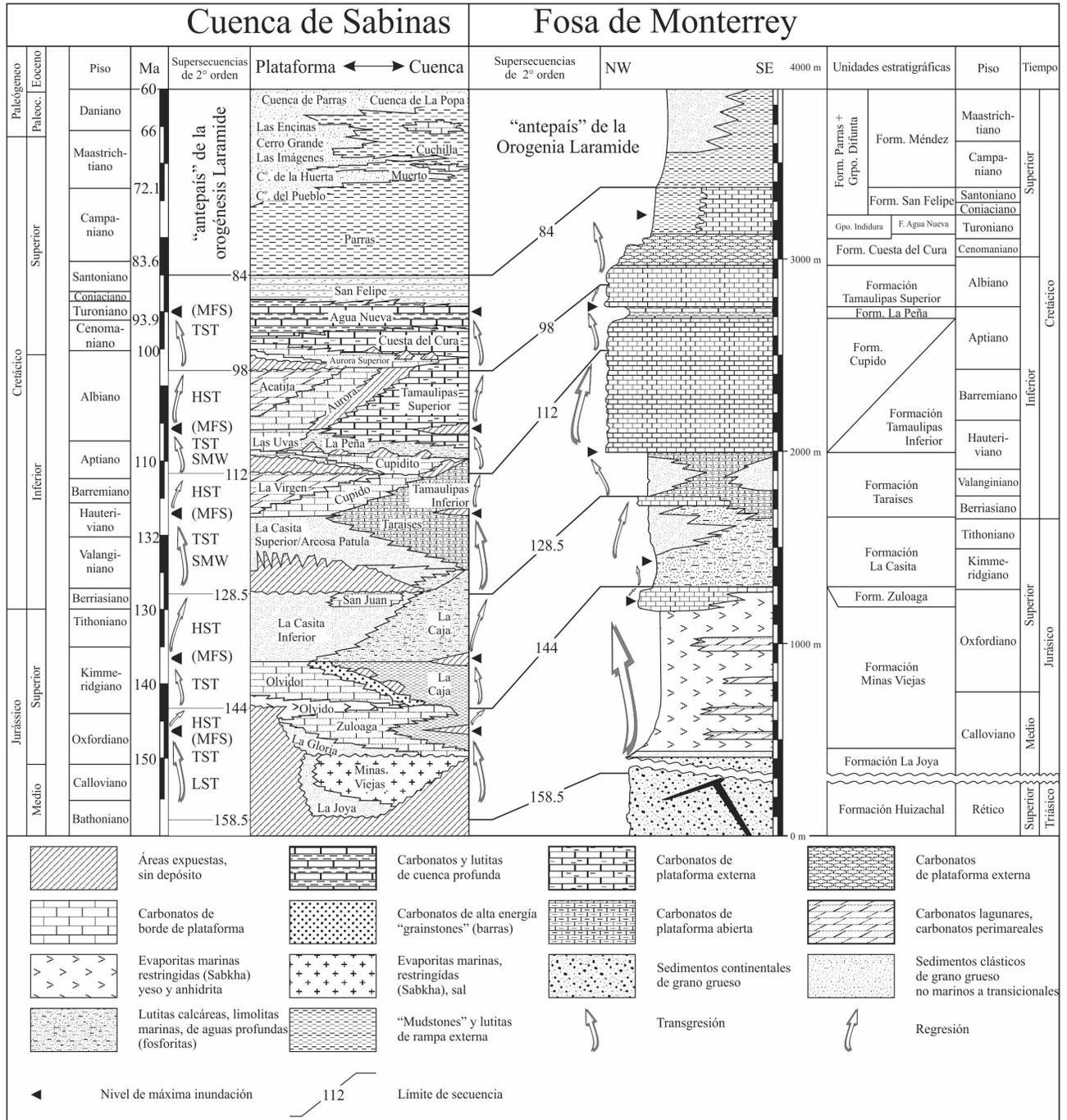


Figura 2. Correlación de las columnas estratigráficas de Goldhammer y Johnson (2001; izquierda) y Michalzik (1988; derecha) para el NE de México (modificado de Jenchen, 2007 y Ocampo-Díaz *et al.*, 2008). Los datos cronoestratigráficos y la subdivisión de las unidades estratigráficas de la columna de Goldhammer y Johnson (2001) se basan en los de Haq *et al.* (1987). Abreviaciones: LST: *lowstand system tract*, TST: *transgressive system tract*, MFS: *maximum flooding surface*, HST: *highstand systems tract*, LSW: *lowstand wedge* y SMW: *shelf margin wedge*. Nota: ambas columnas estratigráficas fueron realizadas en diversos años, por lo cual las escalas de tiempo no estén actualizadas y no correspondan.

con las formaciones San Marcos, Capulín, Carbonera, el Miembro San Pablo de la Formación La Casita, y las calizas de la Formación Padilla (Krutak, 1965; Charleston, 1973; Figuras 2 y 3a).

La ausencia de fauna en la Arcosa Patula, no permite asignarle una edad. Sin embargo, por posición estratigráfica con respecto a la Formación Barril Viejo a la cual sobreyace y con las calizas de la Formación La Mula que le subyacen, le asignan una edad del Valanginiano medio al Hauteriviano temprano (Krutak, 1965; Charleston, 1973).

3. Metodología

3.1. Metodología tradicional

Treinta muestras de areniscas de grano mediano a grueso fueron colectadas en dos perfiles sedimentológicos-estratigráficos ubicados en la sierra de La Gavia (cuenca de Sabinas) y en el cañón de Las Cortinas (fosa de Monterrey; Figuras 1–3), con un espaciamiento de muestreo de 30 a 75 m, para realizar secciones delgadas. Veinticinco muestras fueron seleccionadas para realizar un conteo de ~ 1000 puntos excluyendo la matriz y el cemento. Los diferentes tipos de cuarzo fueron clasificados de acuerdo a Blatt y Christie (1963), Basu *et al.* (1975), Basu (1976) y Young (1976). Los diversos fragmentos líticos volcánicos se clasificaron de acuerdo a Dickinson (1970) y Marsaglia *et al.* (1992), mientras que los granos metamórficos fueron clasificados de acuerdo a Garzanti y Vezzoli (2003), quienes emplean subíndices para indicar la evolución del grado metamórfico de la roca madre. Las muestras fueron teñidas en una solución hiperconcentrada de cobaltinitrito de sodio y cloruro de bario, para diferenciar feldespatos potásicos de plagioclasas, aplicando la metodología de Friedman (1971), modificada por Marsaglia y Tazaki (1992). El conteo de puntos se realizó utilizando la metodología de Gazzizuffa modificada por Weltje (2002). Se calcularon diversos índices petrográficos para determinar la composición de las muestras, los cuales fueron graficados en diagramas ternarios diagnósticos de procedencia como son QFL y QmFL (Dickinson *et al.*, 1983), RgRsRm (Arribas *et al.*, 1990; Critelli y Le Pera, 1995) y el diagrama RpRvRs, propuesto en el presente trabajo, como una modificación de RgRsRm de Arribas *et al.* (1990).

3.2. Metodología del Análisis Multivariado

3.2.1. Componentes principales

El Análisis de Componentes Principales (ACP) es una técnica que combina numerosas variables que conforman un sistema y las convierte en variables latentes independientes dentro de una base de datos multivariable (componentes principales). El ACP fue propuesto por Shaw (2003) para realizar una búsqueda dentro de una matriz de coordenadas ortogonales y con ello poder explicar la gran variabilidad dentro de la información composicional de los datos. De manera idealizada, los componentes principales pueden ser independientes de otros componentes. Durante el presente trabajo se efectuó un análisis de CP a partir de los resultados petrográficos que controlan la composición del área fuente (*e.g.* Qm, Qp, Livf, Lvtob, entre otros) de dos formaciones de edad similar (Jurásico Tardío-Cretácico Temprano) y que fueron obtenidos mediante un riguroso conteo de ~ 1000 puntos.

Los resultados del ACP se dibujaron en diagramas binarios, como lo proponen von Eynatten *et al.* (2003), Buccianti y Esposito (2004), Tolosana-Delgado *et al.* (2005)

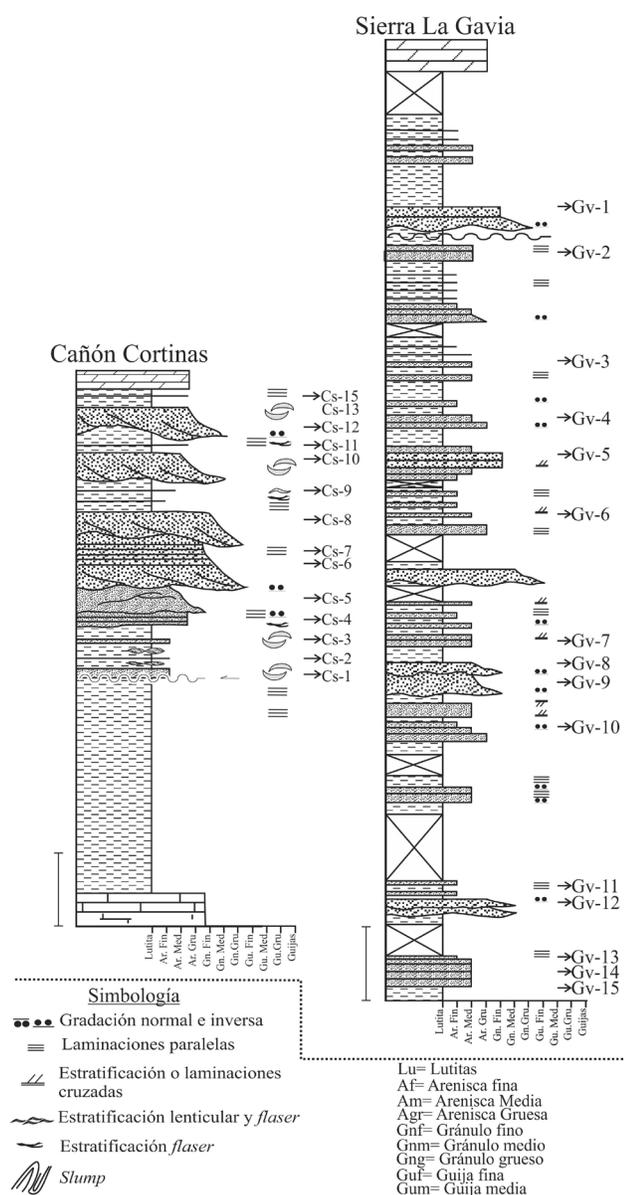


Figura 3. Perfiles sedimentológicos-estratigráficos donde se muestran las características principales de las formaciones estudiadas y la ubicación del muestreo. La barra equivale a 100 m.

y Otha y Arai (2007). Estos métodos están basados en una técnica estadística para el análisis de la información de composiciones propuesta por Aitchison (1986) y Egozcue *et al.* (2003).

1. La información de las composiciones obtenidas del análisis petrográfico representa una muestra en un espacio natural dentro de un *simplex*, que fue graficada como una muestra a escala euclidiana en un espacio real, utilizando las transformaciones logcociente aditiva (*alr*) y logcociente centrada (*clr*) (Aitchison, 1986).
2. Las coordenadas de los componentes principales fueron transformadas a un *simplex* de dos dimensiones (diagrama binario), empleando un mapeo inverso de las transformaciones logcocientes isométricas (*ilr*), (Gabriel, 1971; Aitchison y Greenacre, 2002; Otha y Arai, 2007).
3. Los límites de confianza de 95 %, 97 % y 99 % se calcularon de acuerdo a la metodología de Weltje (2002), que sugiere realizar la transformación logcociente aditiva (*alr*) de la composición de las areniscas. Se considera la media geométrica como el dato más representativo de toda la población dentro del *simplex* (Aitchison, 1986; Weltje, 2002).

La transformación logarítmica de la información tiene la finalidad de que los datos se distribuyan normalmente (Aitchison y Shen, 1980; Aitchison, 1986; Barceló *et al.*, 1996; Reyment, 1999; Weltje, 2002), siendo esto un requisito para realizar el análisis de CP (Atkinson *et al.*, 2004; Otha y Arai, 2007).

3.2.2. Diagramas binarios y ternarios

Los diagramas binarios y ternarios fueron construidos a partir de las transformaciones logcociente aditiva y logcociente centrada (*alr* y *clr*) descritas previamente. Dentro de estos diagramas se representan los niveles de confianza con su media geométrica (90 %, 95 % y 99 %), que fueron calculados por medio del análisis estadístico propuesto por Weltje (2002). Para los diagramas binarios se realizó la transformación logcociente centrada (*clr*) de algunas relaciones indicadoras de cambios en la composición del área fuente (plagioclasa/feldespatos potásico *versus* líticos metamórficos en función de su grado de metamorfismo), con la finalidad de que éstas tengan una escala real dentro del *simplex* (Aitchinson, 1992; von Eynatten *et al.*, 2003; Otha y Arai, 2007).

A manera de un análisis experimental y comparativo, en el presente trabajo se consideraron los datos petrográficos de las montañas Ouachita de edad Carbonífera, puesto que las areniscas que afloran en esas montañas tienen procedencia de rocas metamórficas de bajo grado como las que se han documentado dentro del cratón de Coahuila-Texas, propuestos por Graham *et al.* (1976; Tabla 1), graficados dentro de un diagrama binario que confronta Lv/Qp *versus* Ls/Qp, que es equivalente al diagrama ternario Qp-Lv-Ls de Ingersoll y Suczek (1979).

Tabla 1. Valores Qp, Lv y Ls de las muestra de las montañas Ouachita documentadas por Graham *et al.* (1976).

Muestra	Qp	Lv	Ls
Ouatchi-1	39.4	3.3	56.7
Ouatchi-2	33.4	5.3	64.7
Ouatchi-3	45.4	2.3	48.7
Ouatchi-4	34.4	1.3	57.7
Ouatchi-5	35.4	4.3	58.7
Ouatchi-6	33.4	3.3	59.7
Ouatchi-7	44.4	4.3	60.7
Ouatchi-8	43.4	1.3	61.7
Ouatchi-9	42.4	2.3	62.7
Ouatchi-10	41.4	5.3	63.7
Ouatchi-11	40.4	4.3	49.7
Ouatchi-12	34.4	1.3	50.7
Ouatchi-13	36.4	2.3	51.7
Ouatchi-14	37.4	3.3	52.7

4. Resultados petrográficos

4.1. Textura y composición de las areniscas

Las muestras estudiadas son areniscas de grano mediano a muy grueso, variando de moderadamente a bien clasificadas. Los principales componentes del marco de las areniscas incluyen: fragmentos volcánicos con texturas felsíticas, afáníticas, esferulíticas, *lathwork* y microlíticas; líticos metamórficos con texturas metapelíticas₂, metasamíticas₂, meta-samíticas/felsíticas₄, líticos carbonatados microcristalinos; líticos siliciclásticos de areniscas y lutitas. La redondez de estas partículas está controlada por su composición; por ejemplo los granos carbonatados están más redondeados que los fragmentos de volcánicos felsíticos. La compactación dentro de las muestras ha generado contactos suturados por la disolución por presión entre los diferentes granos (*e.g.* cuarzo-cuarzo; cuarzo-líticos volcánicos); también se observan cristales de biotita deformados por esta causa. Los granos generalmente están soportados por matriz. Sin embargo, en algunas muestras éstos están soportados por clastos, con contactos de punto, rectos o suturados, y rara vez se presentan cóncavos-convexos (Figura 4).

El cemento calcítico se exhibe en mosaicos microcristalinos y microgranulares y calcíticos parcialmente dolomitizados. Los cementos generalmente están rellenando los poros. En las muestras de la Formación La Casita, el cemento también se observa cubriendo a granos de cuarzo, feldespatos y plagioclasas.

Los granos de las muestras estudiadas fueron divididos en cuatro categorías principales, de acuerdo con la metodología de Gazzi-Zuffa (Weltje, 2002): i) no

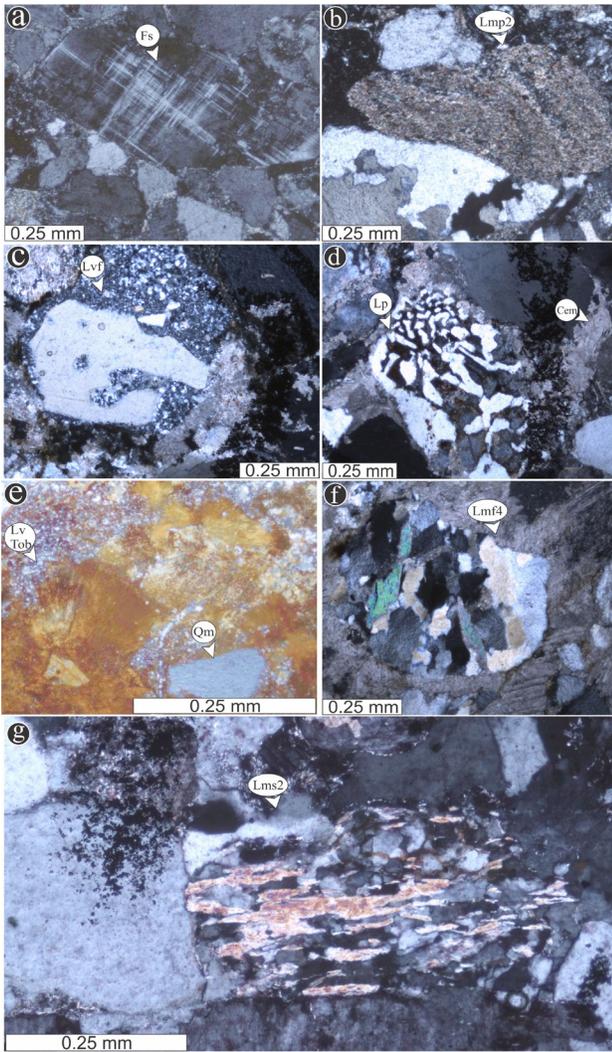


Figura 4. (a) Microclina con maclado en enrejado (Arcosa Patula) (b) lítico metapelítico, (Arcosa Patula) (c) lítico volcánico con textura felsítica (Formación La Casita); (d) lítico plutónico con textura mirmekítica (Formación La Casita); (e) lítico volcánico con textura esferulítica (Formación La Casita); (f) lítico metafelsítico/samítico (Formación La Casita) y (g) lítico metafelsítico/samítico (Arcosa Patula).

carbonatados de extracuenca (NCE); ii) carbonatados de extracuenca (CE); iii) no carbonatados de intracuenca (NCI) y iv) carbonatados de intracuenca (CI).

4.1.1. Granos no carbonatados de extracuenca (NCE)

Los granos no carbonatados de extracuenca se distribuyen en seis subcategorías principales: cuarzo, feldespatos, líticos volcánicos, líticos metamórficos, micas y minerales pesados. Los granos de cuarzo predominantes son los monocristalinos con extinción recta "Qmr" ($28\% \pm 6$; Arcosa Patula; $n = 14$ y $26\% \pm 6$, Formación La Casita; $n = 11$; Figura 4). Los granos de cuarzo monocristalino son subangulosos a subredondeados, los cuales en algunos casos exhiben bordes de crecimiento sintaxial. Los granos de cuarzo policristalino con más de tres cristales ($Qp > 3$)

son subredondeados, mostrando texturas tectónicas, caracterizadas por exhibir contactos suturados y extinción individual grano a grano, y son más abundantes que los granos de cuarzo policristalino que incluyen menos de tres cristales ($1.5\% \pm 1$, Arcosa Patula; $6\% \pm 2$, Formación La Casita; Figura 4 y Tabla 2). Los cristales de feldespato son de dos tipos. El primer tipo son los potásicos, principalmente subredondeados con o sin maclado de tipo Carlsbad y de tipo enrejado, que alteran generalmente a minerales arcillosos no diferenciados. En las muestras de ambas formaciones están presentes los dos tipos de feldespato. Sin embargo, éstos son más abundantes en las muestras de la Arcosa Patula (8% , Arcosa Patula; 5% , Formación La Casita; Figura 4; Tabla 2). El segundo tipo son plagioclasas sub-redondeadas, exhibiendo un maclado de tipo polisintético y alterando generalmente a sericita. El contenido de plagioclasas es comparable en ambas formaciones ($\sim 16\%$; Tabla 2). Los fragmentos líticos volcánicos son subredondeados a redondeados, mostrando en orden de abundancia las siguientes texturas: (i) texturas volcánicas afaníticas (0.1% , Arcosa Patula; 3.7% , Formación La Casita); (ii) textura volcánica felsítica (0.1% , Arcosa Patula; 0.1% , Formación La Casita); (iii) volcánicas lathwork (0.01% , Arcosa Patula; 0.5% , Formación La Casita) y (iv) volcánicas microlíticas (0.01% , Arcosa Patula; < 0.01 , Formación La Casita; Figura 4). Los fragmentos con texturas volcánicas afaníticas y esferulíticas, felsíticas y lathwork son más abundantes en las muestras de la Formación La Casita, mientras que los fragmentos con texturas volcánicas microlíticas son más abundantes en las muestras de la Arcosa Patula. Los fragmentos líticos metamórficos presentan tres texturas relacionadas con su grado metamórfico (Garzanti y Vezzoli, 2003): (i) metamórficos metapelíticos2 (ii) metamórficos metasamíticos/felsíticos2 y (iii) metamórficos metasamíticos/felsíticos4. En las muestras de la Arcosa Patula, son más abundantes los fragmentos de grado metamórfico bajo (metapelíticos2 y metasamíticos/felsíticos2), mientras que las muestras de la Formación La Casita están más enriquecidas en líticos metamórficos metasamíticos/felsíticos4 (Figura 4). Los componentes accesorios son principalmente filosilicatos (biotita, muscovita y clorita), aunque también se encuentra glauconita y minerales pesados (circón, rutilo, turmalina y apatito).

4.1.2. Granos carbonatados de extracuenca (CE)

Este grupo está constituido por fragmentos de calizas y dolomías. Los fragmentos redondeados a bien redondeados de calizas presentan texturas microcristalinas. Las calizas microcristalinas son más abundantes en la Formación La Casita ($\sim 3.9\%$) mientras que la Arcosa Patula está más enriquecida en fragmentos carbonatados microgranulares ($\sim 0.7\%$). Los fragmentos carbonatados de la Formación La Casita muestra texturas parcialmente dolomitizadas. En ambas formaciones los fragmentos carbonatados son menores al 0.009% . En este grupo es común encontrar fragmentos

Tabla 2. Parámetros empleados en los diagramas ternarios

Zuffa (1980)	Dickinson <i>et al.</i> (1983)	Abreviatura	Nombre completo	
NCE	Q	Qmr	Cuarzo monocristalino con extinción recta <5	
		Qmo	Cuarzo monocristalino con extinción recta >5	
		Qp2-3	Cuarzo policristalino con 2-3 cristales	
		Qp > 3	Cuarzo policristalino >3 cristales	
		Qrm	Cuarzo en roca metamórfica	
		Qrp	Cuarzo en roca plutónica	
		Qla	Cuarzo en arenisca	
		Crq	Cemento bordeando cuarzo	
		Fs	Feldespatos en un solo cristal	
		Frbg	Feldespatos en fragmento de roca plutónica o gneílica	
		Krf	Caolinita remplazando feldespato	
		F	Crf	Cemento remplazando feldespato
			Flvf	Feldespatos en roca volcánica felsítica
			Flvtob	Feldespatos en roca volcánica tobácea
	Flvlat		Feldespatos en lítico <i>lathwork</i>	
	Ps		Plagioclasa en un solo cristal	
	P	Prpg	Plagioclasa en roca plutónica o gneílica	
		Plvf	Plagioclasa en roca volcánica felsítica	
		Plvtob	Plagioclasa en roca volcánica tobácea	
		Plvlat	Plagioclasa en lítico <i>lathwork</i>	
		SrP	Sericita remplazando plagioclasa	
		CrP	Cemento alterando plagioclasa	
		Ch	Pedernal	
		Lsa	Lítico sed. de arenisca	
		Lslu	Lítico sedimentario de lutita	
		Lsvf	Lítico sed. volcánico felsítico	
	L	Lsvtob	Lítico sed. volcánico tobáceo	
		Lsvlat	Lítico sed. volcánico <i>lathwork</i>	
LsvMic		Lítico sed. volcánico microlítico		
LsP		Lítico sed. plutónico		
Lmp₂		Lítico metapelítico ₂		
Lmsf₂		Lítico metaspamítico/felspítico ₂		
Lmsf₄		Lítico metaspamítico/felsítico ₄		
LsSq		Lítico sed. de esquisto.		
CE		LsCm	Lítico sed. caliza micrítica	
		LsCs	Lítico sed. caliza- esparítica	
Accesorios	Micas	Mus	Muscovita	
		Biot	Biotita	
		Clo	Clorita	
		Ep	Epidota	
	Cementos	Cem.dol	Cemento dolomitizado	
		Cem.Sp	Cemento Esparítico	
		Cem.Cal	Cemento calcítico	
	Accesorios	Opacos	Opacos	
		Fósil	Fósil	
		Circón	Circón	
		Apatito	Apatito	

de fósiles, principalmente moluscos y equinodermos en proporciones similares en ambas formaciones (~ 0.001 %).

4.1.3. Granos no carbonatados de intracuenca (NCI)

Este tipo de granos es muy escaso y consiste principalmente de granos limo-arcillosos o limosos de gran tamaño, los cuales pueden estar asociados con partículas siliciclásticas de extracuenca y pueden ser confundidos con la seudomatriz. Los granos NCI son tan poco abundantes que no fue posible cuantificarlos (Tabla 2).

4.1.4. Granos carbonatados de intracuenca (CI)

Los granos carbonatados de intracuenca son escasos y pueden ser confundidos con granos carbonatados de extracuenca. Este tipo de granos se diferencian por medio de las propiedades físicas de las partículas (e.g. forma, redondez y tamaño). De manera similar a los NCI, los CI no son cuantificables en el área estudio.

5. Análisis de procedencia

Los diferentes parámetros petrográficos muestran que las areniscas del límite Jurásico Tardío-Cretácico Temprano son principalmente cuarzo-feldespáticas (Ingersoll y Suczek, 1979). Las areniscas de la Arcosa Patula son clasificadas como arenitas feldespáticas, mientras que las de la Formación La Casita son arenitas líticas-arenitas feldespáticas de acuerdo a Okada (1971; Figura 5). Los fragmentos líticos más abundantes son volcánicos con texturas afáníticas y esferulíticas. Los líticos sedimentarios carbonatados son similares en ambas formaciones, mientras que los fragmentos líticos metamórficos de bajo grado son más concentrados en la Arcosa Patula (cuenca de Sabinas), evidenciando la exposición de bloques de basamento con diversas facies metamórficas.

5.1. Ambiente tectónico

Dickinson y Suczek (1979) y Dickinson *et al.* (1983) propusieron dos diagramas ternarios construidos con el análisis modal de areniscas de diferentes ambientes tectónicos, con los cuales es posible interpretar el ambiente geotectónico en el que las areniscas fueron depositadas (diagramas QFL y QmFL; Tablas 3 y 4). En el diagrama QFL, las muestras de la Arcosa Patula se ubican en los campos de orógenos reciclados y en los límites de orógenos reciclados, basamento levantados y transición continental, mientras que las provenientes de la Formación La Casita se ubican en el campo de orógenos reciclados y arcos disectados (Figura 6a). Sin embargo, dentro del diagrama QmFL, las muestras de la Formación La Casita se encuentran dentro de los campos de arco disectado-transición continental, mientras que las muestras de la Arcosa Patula se ubican dentro de los campos de basamento levantado-transición continental (Figura 6b). Otros autores han propuesto distintos diagramas

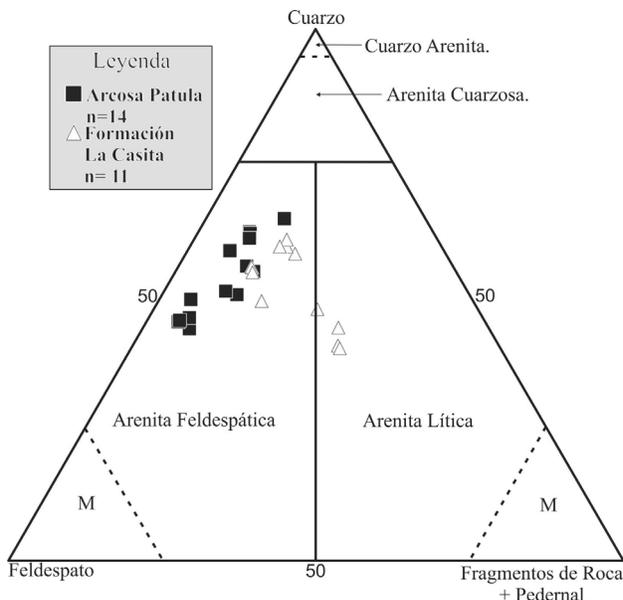


Figura 5. Diagrama ternario Q-F-FR+pedernal, para clasificar areniscas de acuerdo a Okada (1971).

ternarios para documentar el ambiente tectónico en donde fueron generados los sedimentos siliciclásticos, tal como el diagrama QpLvLs (Graham *et al.*, 1976, modificado por Ingersoll y Suczek, 1979; Tablas 3 y 4). Dentro de dicho diagrama las muestras de la Formación La Casita se sitúan en una parte intermedia entre bloques continentales de tipo *rift* y arcos continentales, mientras que las areniscas de la Arcosa Patula se encuentran dentro de los campos de márgenes continentales de tipo *rift*, complejos de subducción y arcos continentales (Figura 6c).

5.2. Composición de las áreas fuente

En el presente trabajo se han empleado varios criterios que han evaluado la composición de las diversas áreas fuente que han dado origen a las rocas siliciclásticas: (i) diferentes tipos de cuarzo; (ii) concentración relativa de diferentes fragmentos líticos y (iii) las diferentes relaciones que presentan (plagioclasa/feldespato).

5.2.1. Tipos de cuarzo

Basu *et al.* (1975) evaluaron la relación que presentan los diferentes tipos de cuarzo (policristalino vs. monocristalino) y la extinción que los caracteriza (recta u ondulante), a fin de poder determinar la composición del área fuente. Estos autores proponen un diagrama que tiene los parámetros: $Qm_o, Qm_r, Qp < 3$ y $Qp > 3$ (Tablas 2-4). En este diagrama las muestras de ambas formaciones sugieren procedencias de rocas graníticas y rocas metamórficas de grado medio a alto (Figura 7a). Sin embargo, dicho diagrama fue modificado por Molinarolli *et al.* (1991), quienes realizaron un análisis multivariado de funciones discriminantes. Esta metodología ha sido empleada en el presente trabajo, para

Tabla 3. Porcentajes que fueron graficados en los diagramas ternarios QFL, QmFL, QpLvLs, RgRsRm, RpRvRs

Diagrama Ternario	Parámetros
QFR	$Q = Qmr + Qmo + Qp2-3 + Qp > 3 + Qrm + Qrp + Crq$ $F = Fs + Frpg + Krf + Crf + Flvf + Flvtob + Flvlat + Ps + Prpg + Plvf + Plvtob + Plvlat + Srp + Crp$ $Lt = Lsa + Lslu + Lscm + Lscs + Lsvf + Lsvtob + Lsvlat + Lsvmic + Lssq + Lsp + Qrp + Qla + Frpg + Flvf + Qp > 3 + Flvlat + Prpg + Plvf + Plvtob + Plvlat$
QpLvLs	$Qp = Qp2-3 + Qp > 3 + Ch$ $Lv = Lsvf + Lsvtob + Lsvlat + Lsvmic$ $Ls = Lsa + Lslu + Lscm + Lscs$
RgRsRm	$Rg = Qrp + Frpg + Flvf + Flvtob + Flvlat + Prpg + Plvf + Plvtob + Plvlat + Lsvf + Lsvtob + Lsvlat + Lsvmic + Lsp$ $Rs = Qla + Lsa + Lslu + Lscm + Lscs$ $Rm = Qrm + Lssq$
RpRvRs	$Rp = Qrp + Prpg + Lsp$ $Rv = Flvf + Flvtob + Flvlat + Plvf + Plvtob + Plvlat + Lsvf + Lsvtob + Lsvlat + Lsvmic$ $Rs = Qla + Lsa + Lslu + Lscm + Lscs$

Tabla 4. Relaciones petrográficas empleadas en los perfiles de evolución vertical.

Muestra	QFL			QmFL			QpLvLs			RgRsRm			RpRvRs		
	Q %	F %	L %	Qm %	F %	L %	Qp %	Lv %	Ls %	Rg %	Rs %	Rm %	Rp %	Rv %	Rs %
Gv-1	50.8	39.2	10	51.8	43.6	4.6	50.9	2.7	46.4	58.4	41.4	0.2	40	6.5	53.5
Gv-2	49.3	45.6	5.2	49.6	46.6	3.9	16.8	10.4	72.8	36.1	63.6	0.3	13.8	11.8	74.5
Gv-3	43.8	48.8	7.3	42.8	54.4	2.9	77	1.7	21.3	63.2	30.3	6.5	53.6	4.5	42
Gv-4	45.3	49.3	5.4	45.8	51.8	2.4	51.5	0.8	47.7	55.6	31.4	13	54.2	2	43.8
Gv-5	45.9	47.9	6.3	46	50.3	3.7	45	5.1	49.9	50.2	47.4	2.4	31.2	14	54.8
Gv-6	45	49.8	5.2	45.3	52	2.7	39.7	0.6	59.7	46.8	48.5	4.7	28.2	12.5	59.3
Gv-7	61.3	30.8	7.9	62	32.4	5.6	48.7	0.4	50.9	40	49.6	10.4	13.9	30.8	55.3
Gv-9	65.4	23.4	11.2	64.9	24.8	10.2	45.6	1.2	53.2	19.9	72.6	7.5	17.7	3.8	78.5
Gv-10	55	33.3	11.7	55.6	37.4	7	61.3	4.1	34.6	43.7	50.5	5.8	23.7	21	55.3
Gv-11	50.2	38	11.9	51.2	41	7.8	32	0.4	67.5	31.5	62.3	6.2	9.9	23.8	66.4
Gv-12	58.7	35	6.3	59.9	37.9	2.2	80.5	0.9	18.6	67.8	21.5	10.7	9.1	66.9	24
Gv-13	62	29.7	8.3	62.8	30.8	6.4	20.3	10.9	68.8	28.3	69.2	2.5	9.9	19.1	71
Gv-14	55.8	33.8	10.4	56.9	37.4	5.6	58.7	0.5	40.8	42.5	47.1	10.4	24.7	22.7	52.5
Gv-15	61.9	30.1	8	63	33.6	3.4	75.6	1.8	22.5	42	40.3	17.7	24.5	26.6	48.9
Cs-2	49.5	34.5	16	49.3	39.1	11.6	43.6	17	39.5	46	53.4	0.6	20.2	26.6	53.2
Cs-3	58.8	25.3	15.9	59.7	32.1	8.2	65.5	13.8	20.6	50.9	47.4	1.7	17.5	33.9	48.6
Cs-4	59.3	26.3	14.4	60.5	31.7	7.8	61.8	18.8	19.5	64.6	35.2	0.1	26.4	38.3	35.3
Cs-5	55.4	32.8	11.8	56.4	37.7	5.9	59.3	14	26.7	60.1	37.8	2.1	20.4	28	51.6
Cs-6	58.1	24.6	17.3	59.2	31.5	9.3	64.7	20.8	14.5	68.4	31.5	0.1	9.9	58.6	31.5
Cs-8	60.4	24.4	15.3	62.9	29.1	7.9	55.5	29	15.5	78.5	21.3	0.2	13.5	65.1	21.4
Cs-10	54.7	33.2	12.1	54.6	35.6	9.8	32.9	12.6	54.5	25.6	73.5	0.9	4.2	19.1	76.7
Cs-11	40.1	26.2	33.6	38.5	32.9	28.5	33.3	41	25.7	72.2	26.7	1.1	22.5	52.5	25

comparar nuestros resultados con los obtenidos del diagrama de Basu *et al.* (1975; Figura 7b).

Dentro del diagrama ternario que incluye los parámetros Qmr-Qmo-Qp (Arribas *et al.*, 1990; Tablas 3 y 4; Figura 7c), la muestras de la Arcosa Patula se encuentran cerca del lado Qmr-Qmo, mientras que las muestras de la Formación La Casita se localizan en la parte intermedia del diagrama, mostrando un claro enriquecimiento de cuarzo policristalino relacionado con rocas metamórficas de grado medio a alto.

5.2.2. Fragmentos líticos

Los diferentes fragmentos líticos reconocidos en este trabajo tienen las siguientes composiciones: andesítica, riolítica, basáltica, granítica y de tobas riolítica y dacítica. Los líticos sedimentarios son de arenisca y lutita. Los líticos metamórficos sugieren una procedencia de rocas metamórficas de grado bajo y medio a alto. Dentro de los diagramas ternarios que incluyen los diferentes ensambles

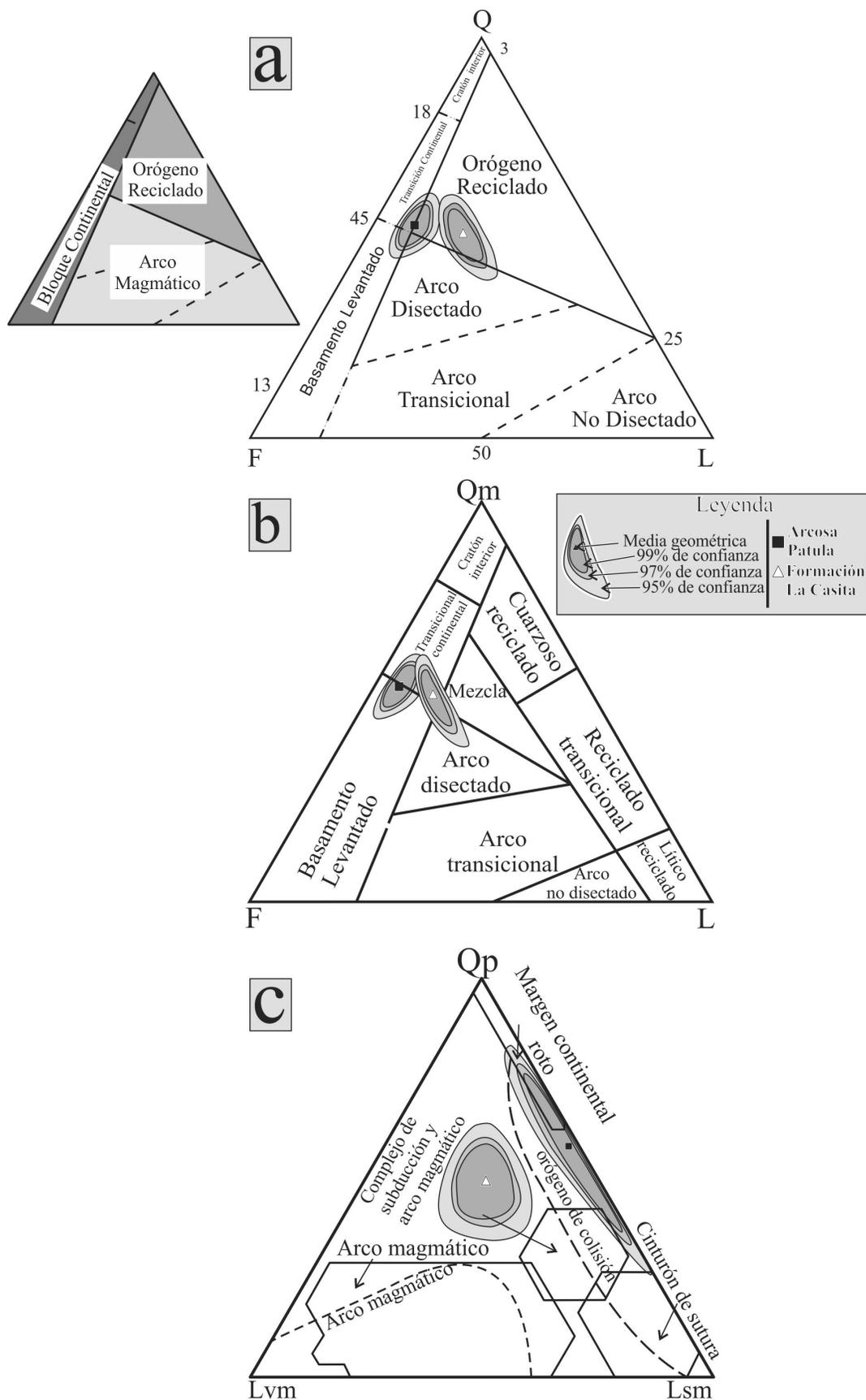


Figura 6. Diagramas ternarios empleados para determinar ambiente tectónico: (a) Diagrama QFL de Dickinson *et al.* (1983); (b) Diagrama ternario QmFL (Dickinson *et al.*, 1983); (c) Diagrama ternario QpLvLs (Ingersoll y Suczek, 1979).

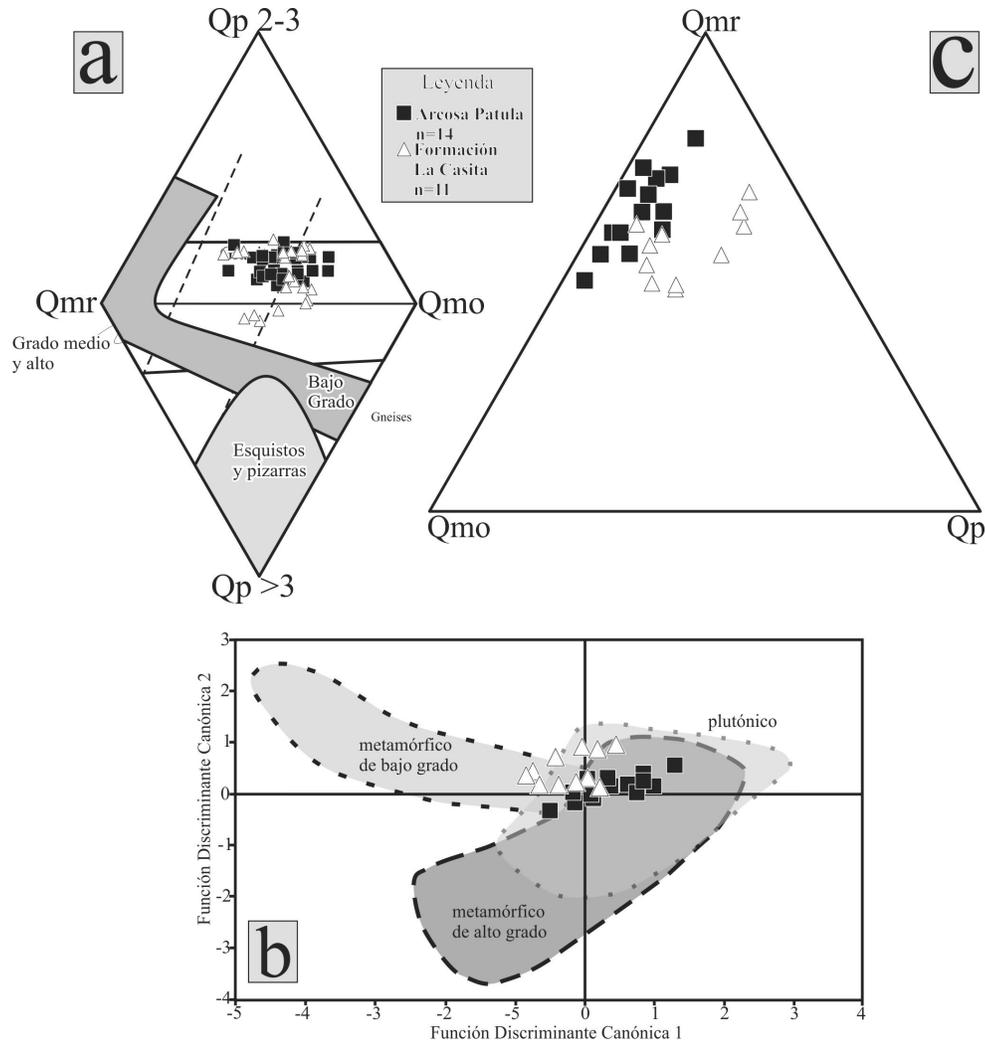


Figura 7. (a) Diagrama de los tipos de cuarzo de acuerdo a Basu *et al.* (1975), modificado por Tortosa *et al.* (1991); (b) diagrama binario modificado por Molinarrolli *et al.* (1991) del diagrama clásico de Basu *et al.* (1975); (c) diagrama ternario Qmr-Qmo-Qp, tomado de Arribas *et al.* (1990).

líticos (Rg-Rs-Rm, Arribas *et al.*, 1990, 2003, Tablas 3 y 4, y Rp-Rv-Rs, de Ocampo-Díaz, 2011, 2012) las muestras de ambas formaciones se encuentran en la parte media del lado Rg-Rs (Figura 8a). En contraste, en el diagrama Rp-Rv-Rs las muestras de la Formación La Casita se sitúan en la parte intermedia del lado Rv-Rs, mientras que las muestras de la Arcosa Patula se ubican en los límites Rs-Rp, mostrando una tendencia clara hacia el campo Rs (Figura 8b; Tablas 3 y 4).

6. Evolución vertical de la composición de las areniscas

Las variaciones en la composición de las areniscas (Figura 9) fueron determinadas en dos secciones medidas en la sierra de La Gavia (Arcosa Patula) y en el cañón de Las Cortinas (Formación La Casita), donde fue realizado el muestreo sistemático, empleando diversos índices de composición propuestos por Arribas y Arribas (1991),

Marsaglia *et al.* (1992) y Zuffa (1980).

La relación $NCE/[NCE+CE]$ en el perfil del cañón de Las Cortinas tiende a aumentar en la parte media de la sección y disminuye hacia la cima (Figura 9; Tabla 5). Este patrón puede sugerir que el máximo aporte de partículas NCE ocurrió durante el depósito de la parte media de la Formación La Casita, mientras que el incremento de líticos $NCE+CE$ hacia la cima, representa la erosión de partículas carbonatadas del Miembro Nogales o formaciones subyacentes como la Formación Zuloaga, Olvido o Minas Viejas, que han sido documentadas por diversos autores (Michalzik, 1988). Los valores en la sierra de La Gavia disminuyen hacia la cima, mostrando tres patrones de incremento que marcan la incorporación de partículas CE durante periodos de relajación tectónica. Las posibles áreas fuente son las calizas de la Formación Padilla, evidenciando un dominio más carbonatado en la cuenca de Sabinas.

La tendencia de la relación $F/[F+Qm]$ en el cañón de Las Cortinas y en la sierra de La Gavia es decrecimiento

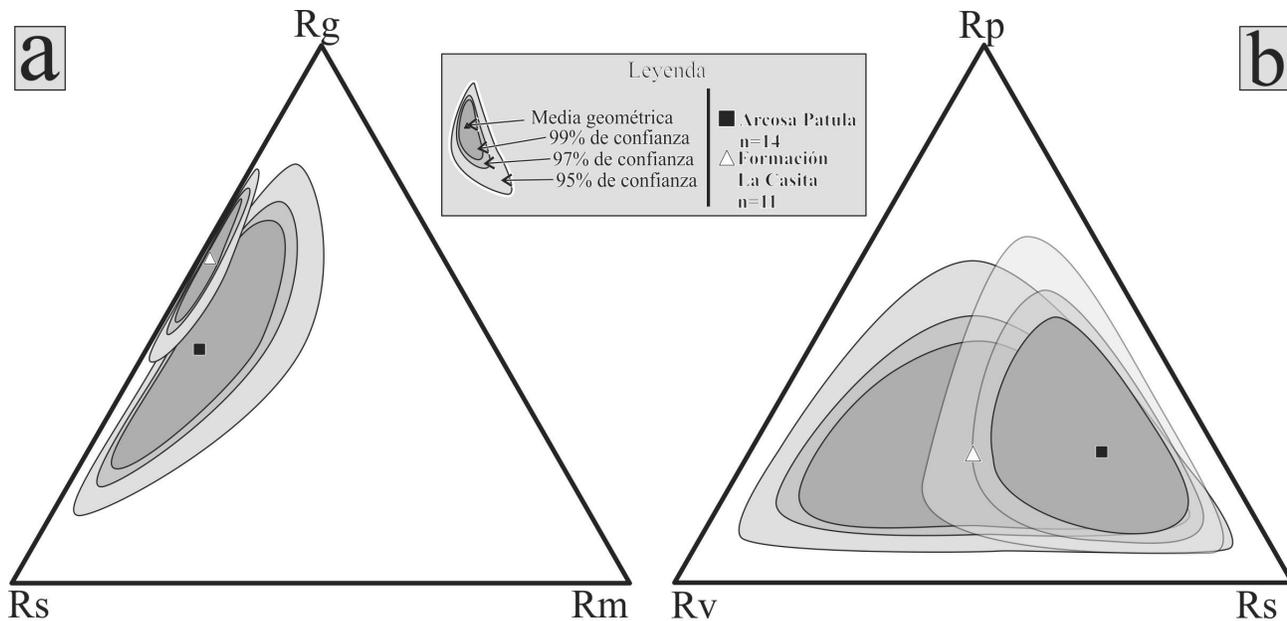


Figura 8. (a) Diagrama ternario Rg-Rs-Rm de Arribas *et al.* (1990); (b) diagrama ternario Rp-Rv-Rs, propuesto en el presente trabajo.

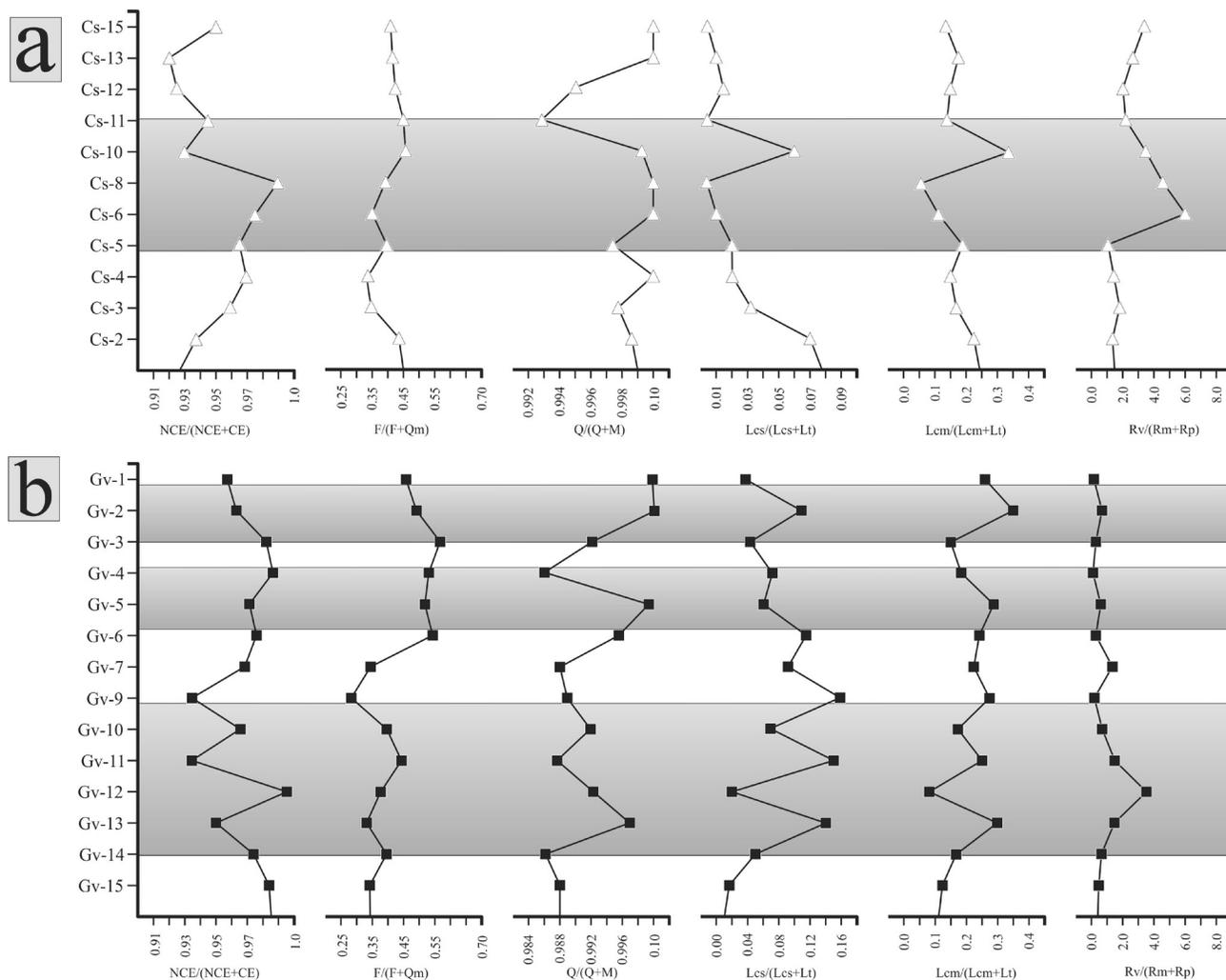


Figura 9. (a) y (b) Tendencias verticales que muestran las diferentes relaciones en la Formación La Casita y en la Arcosa Patula.

Tabla 5. Factores de correlación entre los componentes principales.

Muestra	NCE/ [NCE+CE]	F/ [F+Qm]	Q/ [Q+M]	Lcs/ [Lcs+Lt]	Lcm/ [Lcm+Lt]	Rv/ [Rm+Rp]
Gv-1	0.96	0.46	1	0.04	0.26	0.13
Gv-2	0.97	0.48	1	0.11	0.35	0.75
Gv-3	0.98	0.56	0.99	0.05	0.15	0.05
Gv-4	0.98	0.53	0.99	0.07	0.18	0
Gv-5	0.97	0.52	1	0.06	0.28	0.38
Gv-6	0.98	0.53	1	0.12	0.25	0.33
Gv-7	0.97	0.34	0.99	0.09	0.24	1.18
Gv-9	0.93	0.28	0.99	0.16	0.28	0.13
Gv-10	0.96	0.4	0.99	0.07	0.18	0.68
Gv-11	0.94	0.44	0.99	0.15	0.25	1.4
Gv-12	0.99	0.39	0.99	0.02	0.08	3.14
Gv-13	0.95	0.33	1	0.14	0.3	1.5
Gv-14	0.97	0.4	0.99	0.05	0.16	0.59
Gv-15	0.99	0.35	0.99	0.01	0.12	0.53
Cs-2	0.94	0.44	1	0.07	0.23	1.27
Cs-3	0.96	0.35	1	0.03	0.17	1.74
Cs-4	0.97	0.34	1	0.02	0.15	1.44
Cs-5	0.97	0.4	1	0.02	0.19	1.18
Cs-6	0.98	0.35	1	0.01	0.1	5.93
Cs-8	0.99	0.32	1	0	0.05	4.81
Cs-10	0.93	0.39	1	0.06	0.34	3.67
Cs-11	0.94	0.46	0.99	0	0.13	2.23
Cs-12	0.93	0.45	1	0.01	0.15	2.1
Cs-13	0.92	0.43	1	0.01	0.17	2.69
Cs-15	0.95	0.42	1	0	0.14	3.33

hacia la parte media y un ligero aumento hacia la cima de las secuencias (Figura 9; Tabla 5), indicando una contribución regional de rocas cristalinas hacia la parte superior de la secuencia. Los intrusivos graníticos o granodioríticos de edades pérmicas-triásicas, que han sido reportados en la isla de la Mula y el archipiélago de Tamaulipas y dentro de la isla de Coahuila (Haenggi y Muehlberger, 2005; McKee *et al.*, 1990), podrían haber originado este patrón. Del mismo modo, esta relación indica un incremento de posibles fuentes metamórficas cristalinas (*e.g.* rocas gnéissicas).

Los valores de Q/[Q+M] (cuarzo total contra cuarzo total más líticos metamórficos) en el cañón de Las Cortinas exhibe patrones de enriquecimiento de fuentes metamórficas, siendo muy marcados hacia la parte superior de la secuencia. Un comportamiento similar se observa en la relación de F/[F+Qm] (Figura 9; Tabla 5). La relación Q/[Q+M] en la sierra de La Gavia presenta un incremento de cuarzo hacia la cima. Sin embargo, se observan cuatro patrones de enriquecimiento, sugiriendo que las muestras de la Arcosa Patula están más enriquecidas en líticos metamórficos.

Las tendencias que presentan las relaciones Lcs/[Lcs+Lt] y Lcm/[Lcm+Lt], en el cañón de Las Cortinas son comparables, sugiriendo un decremento de líticos carbonatados microcristalinos y esparíticos hacia la cima (Figura 9; Tabla 5). Entre tanto, en la sierra de La Gavia, éstos se enriquecen hacia la parte media del perfil. Sin embargo, los líticos de calcita microcristalina aumentan hacia la cima y los líticos carbonatados esparíticos disminuyen, sugiriendo el posible depósito de las formaciones carbonatadas en las inmediaciones de la isla de la Mula y su reciclamiento.

Tabla 6. Factores de correlación entre los Componentes Principales

Parámetro	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4
Qmr	0.19	-0.61	-0.08	-0.18
Qmo	0.41	0.02	0.65	-0.26
Qp ₂₋₃	-0.45	0.26	0.61	0.02
Qp>3	-0.6	-0.47	0.43	0.1
Fs	-0.15	0.8	0.21	-0.16
Ps	0.02	-0.8	0.03	-0.07
Ch	0.26	-0.51	0.4	-0.3
Lsa	-0.27	-0.78	0.12	0.23
Lslu	0.03	-0.54	-0.13	0.12
LsCm	-0.58	-0.16	-0.48	-0.5
LsCs	0.5	-0.23	-0.28	-0.61
Lsvf	-0.84	0.16	-0.21	-0.01
Lsvtob	-0.87	-0.18	0.09	-0.1
Lsvlat	-0.86	-0.18	0	0.12
Lmp ₂ ,Lms ₂	0.8	-0.38	0.11	0.21
Lmf ₄	-0.46	0	0.32	-0.55
LsP	-0.84	-0.21	-0.07	0.08

El ensamble lítico Rv/[Rm+Rp] representa la relación de los fragmentos de rocas volcánicas y la suma de rocas metamórficas más rocas plutónicas. En el cañón de Las Cortinas este ensamble da lugar a un patrón de enriquecimiento hacia la parte media que se empobrece hacia la cima (Figura 9b). En la sierra de la Gavia el ensamble lítico se enriquece en la base y se empobrece hacia la cima. Rocas volcánicas que posiblemente dieron origen a los fragmentos del conjunto mencionado han sido reportadas en la isla de Coahuila (arco Las Delicias), en las formaciones Nazas, Rodeo y Huizachal y en la riolita Aserradero. También se han encontrado en pozos perforados por PEMEX, dentro de la cuenca de Sabinas, reportados por Eguiluz de Antuñano (2001).

7. Resultados estadísticos

7.1. Componentes principales "CP"

El primer componente principal CP1 muestra correlaciones positivas con los valores a los que se les hizo la transformación logcociente centrada y aditiva (*clr* y *alr*) de Qmr, Qmo, Ps, Fs, LsCs y Lmp₂+Lmsf₂, y tiene altas correlaciones negativas con Qp₂₋₃, Qp > 3, Lvf, Lsvtob, Lsvlat, Lmsf₄ y LsP (Tabla 2).

El segundo componente principal CP2 involucra correlaciones positivas entre Qmo, Qp₂₋₃, Fs, Lvf y Lmsf₄ y correlaciones negativas con Qmr, Qp > 3, Ps, Ch, Lsa, Lslu, LsCm, LsCs, Lsvtob, Lsvlat, Lmp₂+Lmsf₂ y LsP.

El componente principal CP3 presenta correlaciones positivas entre Qmo, Qp₂₋₃, Qp > 3, Fs, Ps, Ch, Lsa y Lmf₄, mostrando correlaciones negativas con Qmr, Lslu, LsCm, LsCs, Lsvf.

El componente principal CP4 sugiere correlaciones positivas entre Qp2-3, Qp>3, Lsvlat, Lmp2+Lmsf2 y Lsp, presentando correlaciones negativas con el resto de los datos (Tabla 6). Los valores más altos del total de la variabilidad es de 31.2 % para CP1 y 20.3 % para CP2, que colectivamente suman 51.5 %, por lo cual se consideran como los componentes que explican las características principales de las muestras. Sin embargo, los componentes principales 3 y 4 explican las variables que presentan concentraciones pequeñas (por ejemplo, cemento de pedernal, feldespato en líticos volcánicos o cuarzo en líticos plutónicos) dentro del grupo de datos (10.07 %, CP3 y 7.63 %, CP4; Tabla 6).

Los cuatro componentes principales son ilustrados dentro de un diagrama binario (Figura 10; Gabriel, 1971; Otha y Arai, 2007). Las muestras de la Arcosa Patula son graficadas como CP1. Altas correlaciones positivas de CP1 sugieren que las composiciones de las áreas fuente son de fragmentos líticos carbonatados microcristalinos

(0.5), líticos metamórficos pelíticos₂ y samíticos₂ (0.8). Por otra parte, las correlaciones que presentan el pedernal (0.26) y el cuarzo monocristalino (Qmr = 0.19 y Qmo = 0.41) evidencian fuentes de composición graníticas o granodioríticas y el reciclamiento de formaciones clásticas adyacentes. Las muestras de la Formación La Casita están representadas por CP2 (Figura 10). Las correlaciones positivas que tienen los datos dentro del CP2 indican procedencias de composiciones andesítica o riolítica, como lo indican los líticos volcánicos felsíticos (0.16) y los feldespatos (0.8), mientras que los valores positivos entre Qmo-Qp2-3 y Lmsf₄ (0.20-0.25), sugieren fuentes metamórficas de grado medio a alto (Tabla 6).

Los componentes principales CP3 y CP4 muestran altas correlaciones positivas con Qp>3 y Lmsf₄, lo que sugiere una procedencia de composiciones metamórficas de grado medio a alto. Las correlaciones que presentan los líticos sedimentarios de areniscas (0.24) y de lutitas (0.12)

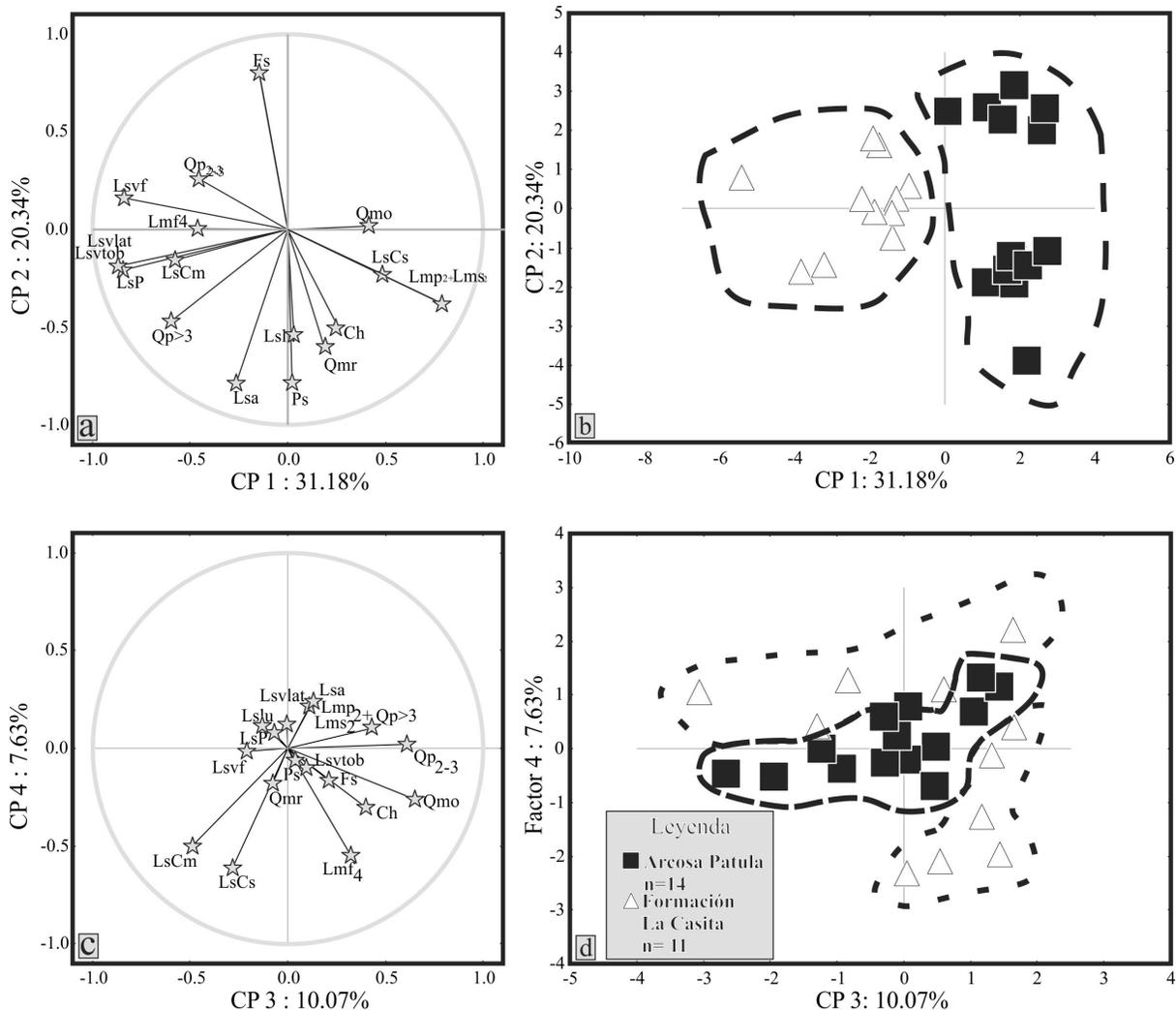


Figura 10: (a) y (c) Diagramas binarios de composiciones de los parámetros obtenidos por medio del análisis estadístico que comparan CP1 vs. CP2 y CP3 vs. CP4; (b) y (d) diagramas binarios para discriminar las dos áreas de estudio que comparan CP1 vs. CP2 y CP3 vs. CP4.

indican que los componentes principales CP3 y CP4 están controlados por el reciclamiento de fuentes siliciclásticas (Figura 10 y Tabla 6).

7.2. Diagramas binarios

En el diagrama P/F *versus* líticos metamórficos (Figura 11) se observa una clara correspondencia en los valores de P/K indicando una posible procedencia de rocas de

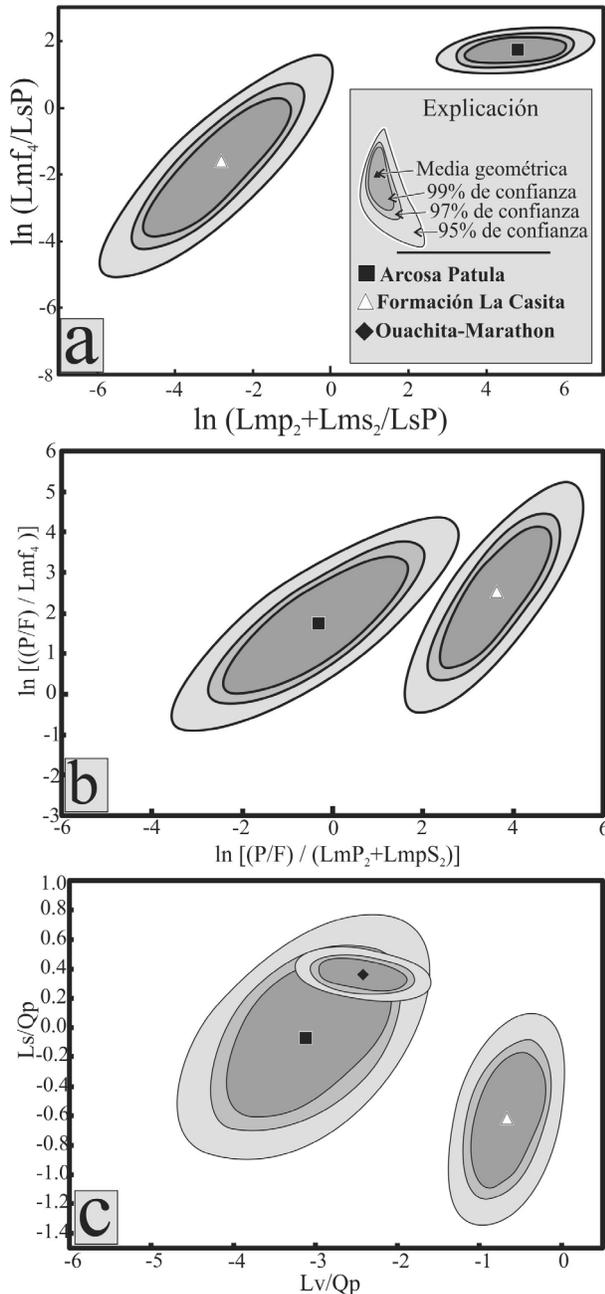


Figura 11: Diagramas binarios que comparan las relaciones obtenidas por las transformaciones clr-logarítmicas de: (a) Lmf_4/LsP vs. $[Lmp_2+Lms_2]/LsP$; (b) $[P/F]/Lmf_4$ vs. $[P/F]/[LmP_2+LmS_2]$; (c) Ls/Qp vs. Lv/Qp . Modificado de Ingersoll y Suczek (1979).

composición granítica o granodiorítica (Figura 11b). Dentro de este diagrama no se observa una diferenciación clara en el contenido de líticos metamórficos con base en su grado metamórfico. Sin embargo, cuando se grafican las relaciones de los líticos metamórficos *versus* sedimentarios y plutónicos, se observa una clara diferencia entre las areniscas de la Arcosa Patula que se encuentran más enriquecidas en líticos metamórficos pelíticos₂ y líticos meta-samíticos/felsíticos₂, mientras que las areniscas analizadas de La Formación La Casita están más enriquecidas en líticos meta-samíticos/felsíticos₄ y en líticos plutónicos (Figuras 11a y 11b).

En el diagrama Ls/Qp *versus* Lv/Qp modificado del diagrama ternario $QpLvLs$ de Ingersoll y Suczek, (1979), la Arcosa Patula se proyecta con el 99 % de confianza sobre las muestras de las montañas Ouachita (Figura 11), mientras que la Formación La Casita se ubica en la porción inferior derecha del diagrama, sin mostrar correspondencia con las muestras de la Arcosa Patula y de las montañas Ouachita de Graham *et al.* (1976).

7.2.1. Clima y relieve

Weltje *et al.* (1998) proponen un diagrama para determinar las condiciones climáticas y el relieve en donde se depositan los sedimentos clásticos. Dicho diagrama se construyó por medio de observaciones actuales en diversas cuencas del mundo y compara la relación de la transformación logcociente aditiva (*alr*) de Q/F y Q/R . En este diagrama las muestras se encuentran dentro de los campos 0-1, donde las muestras de la Formación La Casita derivan de la alteración de rocas plutónicas y las de la Arcosa Patula de rocas metamórficas y sedimentarias alteradas, sugiriendo que estos sedimentos fueron depositados dentro de montañas y valles en condiciones climatológicas semi-áridas y semi-templadas (Figura 12).

8. Discusión

El presente trabajo es el primer estudio petrográfico detallado para determinar y discriminar la procedencia de las secuencias clásticas del Jurásico Tardío-Cretácico Temprano en la fosa de Monterrey y la cuenca de Sabinas.

Las características petrográficas de estas secuencias definen que las formaciones se clasifican como arenitas feldespáticas y arenitas líticas. Esto representa variaciones en las áreas fuente durante la sedimentación clástica del Jurásico Tardío-Cretácico Temprano, es decir que la cuenca de Sabinas y la fosa de Monterrey no muestran correspondencia en sus áreas de aporte, como lo documenta Ocampo-Díaz (2011 y 2012).

Los diversos parámetros indicadores de procedencia sugieren que la Arcosa Patula se relaciona con áreas fuentes muy similares a las montañas Ouachita (Graham *et al.*, 1976). Esta hipótesis fue planteada por Krutak (1965), a partir de un análisis de paleocorrientes, quien

sugirió que la Arcosa Patula procede principalmente de: (i) Potrero de La Mula y (ii) de un terreno emplazado en el archipiélago de Tamaulipas. Los afloramientos reportados de rocas metamórficas de grado bajo, dentro de la cuenca de Sabinas (denominado como alto del Burro-Peyotes), se ubican en la sierra del Carmen y en la mina La Encantada. Adicionalmente, en diversos pozos de PEMEX localizados en la parte norte-noreste del área de estudio se tienen evidencias de estas litologías.

Los sedimentos clásticos del Miembro San Pablo (Formación La Casita) tienen características petrográficas que evidencian que provienen de regiones de arcos disectados-transición continental, por lo que muestran una mayor complejidad en las composiciones de sus áreas fuente. Nuestros resultados indican que la fosa de Monterrey tuvo influencia de las rocas cristalinas del basamento como lo muestran los líticos metamórficos samíticos/felsíticos semejantes al Gneiss Novillo (Ciudad Victoria, Tamaulipas). También se observa influencia de rocas volcánicas de composiciones andesítica, dacítica y riolítica, que podrían estar situadas alrededor del arco Las Delicias o de los arcos del Jurásico Temprano reportados en la isla de Coahuila, en Aramberri, Nuevo León, y en particular en las formaciones Nazas y Rodeo. Esta interpretación discrepa de las de diversos autores (Michalzik, 1988; Eguiluz de Antuñano, 1990; Michalzik y Schumann, 1994; Goldhammer, 1999), quienes han sugerido que la Formación La Casita procede de las rocas volcánicas y metamórficas ubicadas en la parte sur de la isla de Coahuila.

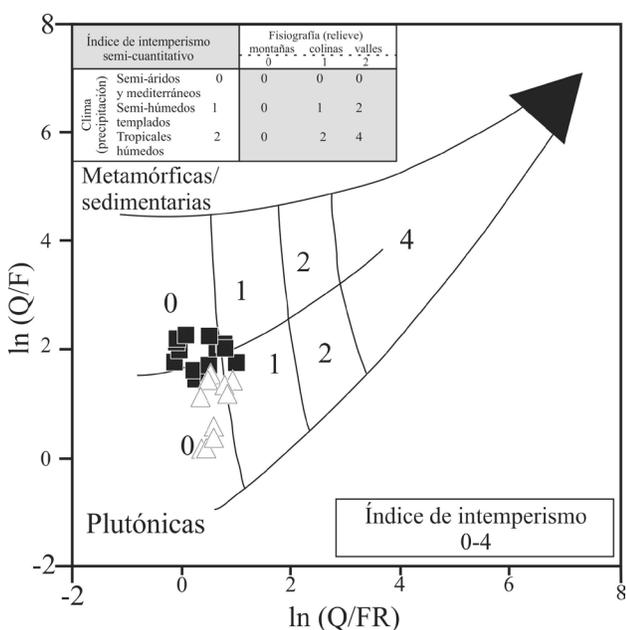


Figura 12. Diagrama binario que confronta la relación alr-logarítmica de Q/F contra Q/FR. (Weltje *et al.* 1998).

9. Conclusiones

Los resultados de la petrografía, conteo modal, así como el análisis estadístico multivariado de componentes principales permiten concluir que:

1. Las areniscas de la Arcosa Patula se clasifican como arenitas feldespáticas con tendencia a las arenitas cuarzosas, mientras que las de la Formación La Casita presentan una tendencia de arenitas líticas a arenitas feldespáticas.
2. De acuerdo con Dickinson y Suczek (1979) y Dickinson *et al.* (1983; diagramas QFL y QmFL), los sedimentos de la Arcosa Patula fueron depositados dentro de zonas de bloques estables y transición continental, mientras que las muestras de la Formación La Casita presentan una afinidad con arcos disectados y regiones de transición continental; ambas interpretaciones a un nivel de confianza del 99 %.
3. La Formación La Casita está más enriquecida en ensamblajes líticos graníticos y sedimentarios (Rg y Rs; 99 % de nivel de confianza), mientras que la Arcosa Patula muestra un enriquecimiento en ensamblajes metamórficos y sedimentarios, con base en el diagrama RgRsRm de Arribas *et al.* (1990). Sin embargo, dentro del diagrama RpRvRs las muestras de ambas formaciones se ubican dentro de los conjuntos plutónicos, sedimentarios y metamórficos, donde la Arcosa Patula se caracteriza por encontrarse más enriquecida en conjuntos de tipo metamórfico.
4. El análisis de componentes principales permitió soportar el resultado del análisis petrográfico sobre la composición de las áreas fuente. Los sedimentos de la Arcosa Patula provienen de rocas metamórficas de bajo grado ($Lmsf_2$, Lmp_2 , $Qp > 3$), líticos carbonatados microcristalinos ($Lscs$) y rocas plutónicas de composiciones granítica o granodiorítica (Qm_0 , Lp). El material de la Formación La Casita en el área del cañón de Las Cortinas proviene de áreas fuente más variadas que incluyen: rocas volcánicas de composiciones andesítica, riolítica y tobácea ($Lsvf$ y $Lsvtob$), rocas carbonatadas microcristalinas ($Lscm$), rocas siliciclásticas recicladas ($Lslu$, $Lsar$) y rocas metamórficas de grado medio a alto ($Lmsf_4$).
5. En comparación con la Formación La Casita, la Arcosa Patula se encuentra más enriquecida en líticos metamórficos de grado bajo y en líticos plutónicos, presentando un 99 % de nivel de confianza de afinidad con las rocas de las montañas Ouachita. Las muestras de la Formación La Casita presentan una mayor abundancia de líticos metamórficos de grado medio a alto y se encuentran más empobrecidas en líticos plutónicos.
6. Las tendencias de evolución petrográfica de las diferentes relaciones empleadas y su comportamiento, indican que: i) la Arcosa Patula incluye dos pulsos de aporte de sedimentos: uno en la base y parte media, y

otro en la cima; y ii) la Formación La Casita muestra un máximo aporte de sedimentos en la parte media de la secuencia.

7. La Arcosa Patula muestra afinidades con: (a) los esquistos reportados en la sierra del Carmen, la mina La Encantada y en el valle de San Marcos, (b) con el granito y la granodiorita que forman parte de la isla de la Mula y de la isla de Monclova y (c) con formaciones carbonatadas y siliciclásticas adyacentes y contemporáneas.
8. La Formación La Casita, dentro de la fosa de Monterrey, exhibe procedencias más complejas y variadas de rocas andesíticas, riolíticas, tobáceas, graníticas, granodioríticas, carbonatadas microcristalinas, lutitas, areniscas y metamórficas de grado medio a alto. Las distintas procedencias que presenta la fosa de Monterrey incluyen: el arco Las Delicias, los intrusivos pérmicos-triásicos (isla de Coahuila y/o el archipiélago de Tamaulipas), rocas metamórficas con grado alto, posiblemente del Gneiss Novillo, de la serie pre-Huizachal (arcos del Jurásico Temprano y Medio) y de las secuencias clásticas del Triásico al Jurásico Tardío reportadas dentro del área de estudio.

Agradecimientos

A Gert Weltje (Department of Applied Earth Sciences, Delft University of Technology), por otorgar el software Tripack, para realizar el análisis estadístico dentro de los diagramas ternarios, a Oscar Talavera por las facilidades brindadas en el Laboratorio de Geoquímica de la Unidad Académica de Ciencias de la Tierra de la UAG, para elaborar la tinción de las láminas delgadas. A Fernando Álvarez y Luis Benito Muñoz Flores, por el soporte durante las salidas a campo. A Fernando Velasco Tapia, por enriquecer el presente trabajo con sus revisiones críticas. A Uwe Jenchen, por las discusiones que tuvimos durante la elaboración del presente trabajo y del trabajo doctoral. A Martín Guerrero-Suástegui, UAG-UACT, por el soporte técnico y enseñanzas brindadas durante la realización del análisis petrográfico en el Laboratorio de Sedimentología (UAG-UACT). A los editores del presente volumen, por la invitación y revisiones, que enriquecieron el presente trabajo. A los árbitros Juan Carlos García y Barragán y Tobías Schwennicke por enriquecer y mejorar notablemente el manuscrito con sus valiosos comentarios y observaciones el presente suscrito. Por último a Igor Ishi Rubio-Cisneros y Margarita Martínez-Paco por enriquecer la versión temprana del borrador y al CONACYT y a la FCT-UANL, por la beca doctoral otorgada al autor.

Referencias

- Aitchison, J., 1986, *The Statistical Analysis of Compositional Data*: London, Chapman & Hall, 410 p.
- Aitchison, J., 1992, On criteria for measures of compositional difference: *Mathematical Geology*, 24, 365–379.
- Aitchison, J., Greenacre, M., 2002, Biplots of compositional data: *Journal of the Royal Statistical Society, Series C (Applied Statistics)*, 51, 375–392.
- Aitchison, J., Shen, S.M., 1980, Logistic-normal distributions—some properties and uses: *Biometrika*, 67, 261–272.
- Anderson, T.H., Silver, L.T., 1979, The role of the Mojave-Sonora Megashield in the tectonic evolution of northern Mexico, *en* Anderson, T.H., Roldán-Quintana, J. (eds), *Geology of northern Sonora*: Geological Society of America, San Diego, California, 1979 Annual Meeting, Field Trip 27 Guidebook, 59–68.
- Anderson, T.H., Silver, L.T., 1981, An overview of Precambrian rocks in Sonora: *Revista del Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México*, 5, 131–139.
- Arribas, J., Arribas, M.E., 1991, Petrographic evidence of different provenance in two alluvial fan systems (Palaeogene of the N Tajo Basin, Spain), *en* Morton A.C., Tood S.P., Haughton P.D.W. (eds.), *Developments in Sedimentary Provenance Studies: The Geological Society, Special Publication*, 57, 263–271.
- Arribas, J., Gómez-Gras, G., Rosell, J., Tortosa, A., 1990, Estudio comparativo entre las areniscas paleozoicas y triásicas de la isla de Menorca: Evidencias de proceso de reciclamiento: *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 3, 105–116.
- Arribas, J., Alonso, A., Mas, R., Tortosa, A., Rodas, M., Barrenechea, J.F., Alonso-Azcárate, J., Artigas, R., 2003, Sandstone petrography of continental depositional sequences of an intraplate rift basin: Western Cameros Basin (North Spain): *Journal of Sedimentary Research*, 73, 309–327.
- Arribas, J., Ochoa, M., Mas, R., Arribas, M. E., González-Acebrón, L., 2007, Sandstone petrofacies in the northwestern sector of the Iberian Basin: *Journal of Iberian Geology*, 33, 191–206.
- Atkinson, A.C., Riani, M., Cerioli, A., 2004, *Exploring Multivariate Data with the Forward Search*: New York, Springer-Verlag, 255 p.
- Barboza-Gudiño, R., Tristán-González, M., Torres-Hernández, J.R., 1998, The Late Triassic-Early Jurassic active continental margin of western North America in northeastern Mexico: *Geofísica Internacional*, 37, 283–292.
- Barboza-Gudiño, R., Tristán-González, M., Torres-Hernández, J.R., 1999, Tectonic setting of pre-Oxfordian units from central and northeastern Mexico: A review, *en* Bartolini, C., Wilson, C., Lawton, T.F. (eds.), *Mesozoic Sedimentary and Tectonic history of North-Central Mexico*: Geological Society of America, Special Paper, 340, 197–211.
- Barboza-Gudiño, R., Orozco-Esquivel, M. T., Gómez-Anguiano M., Zavala-Monsivais, A., 2008, The early Mesozoic volcanic arc of western North America in northeastern of Mexico: *Journal of South American Earth Sciences*, 25, 49–63.
- Barceló, C., Pawlowsky, V., Grunsky, E., 1996, Some aspects of transformations of compositional data and the identification of outliers: *Mathematical Geology*, 28, 501–518.
- Bassett, K.N., Busby, C.J., 2005, Tectonic setting of the Glance Conglomerate along the Sawmill Canyon fault zone, southern Arizona: A sequence analysis of an intra-arc strike-slip basin, *en* Anderson, T.H., Nourse, J.A., McKee J.W., Steiner M.B. (eds.), *The Mojave-Sonora Megashield Hypothesis: Development, Assessment, and Alternatives*: Geological Society of America, Special Paper, 393, 377–400.
- Basu, A., 1976, Petrology of Holocene fluvial sand derived from plutonic source rocks: implication to paleoclimatic interpretation: *Journal of Sedimentary Petrology*, 46, 694–709.

- Basu, A., Young, S.W., Suttner, L.J., James, W.C., Mack, G.H., 1975, Re-evaluation of the use of undulatory extinction and polycrystallinity in detrital quartz for provenance interpretation: *Journal of Sedimentary Petrology*, 45, 873-882.
- Blatt, H., 1967, Original characteristics of clastic quartz grains: *Journal of Sedimentary Petrology*, 37, 401-424.
- Blatt, H., Christie, J.M., 1963, Undulatory extinction in quartz of igneous and metamorphic rocks and its significance in provenance studies of sedimentary rocks: *Journal of Sedimentary Petrology*, 33, 559-579.
- Blatt, H., Middleton G., Murray, R., 1972, *Origin of sedimentary rock: New Jersey, Englewood Cliffs, Prentice-Hall*, 634 p.
- Buccianti, A., Esposito, P., 2004, Insights into Late Quaternary calcareous nannoplankton assemblages under the theory of statistical analysis for compositional data: *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 202, 209-227.
- Campa, M.F., 1985, The Mexican Thrust Belt, *en* Howell, D. G. (ed.), *Tectonostratigraphic terranes of the Circum-Pacific region: Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources, Earth Sciences Series*, 1, 299-313.
- Campa, M.F., Coney, P.J., 1983, Tectono-stratigraphy terranes and mineral resource distributions in Mexico: *Canadian Journal of Earth Science*, 20, 1040-1051.
- Carrillo-Bravo, J., 1961, Geología del Anticlinorio Huizachal-Peregrina al NW de Ciudad Victoria, Tamaulipas: *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, 13, 1-98.
- Charleston, S., 1973, Stratigraphy, tectonics and hydrocarbon potential of the Lower Cretaceous, Coahuila series, Coahuila México: *Ann Arbor, Michigan, University of Michigan*, tesis doctoral, 268 p.
- Chávez-Cabello, G., Cossio-Torres, T., Peterson-Rodríguez, R.H., 2004, Change of the maximum principal stress during the Laramide Orogeny in the Monterrey salient, northeast México, *en* Sussman, A.J., and Weil, A.B. (eds), *Orogenic Curvature: Integrating Paleomagnetic and Structural Analyses: Geological Society of America, Special Paper*, 383, 145-159.
- 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*, XV, 6-15.
- Cox, R., Lowe, D.R., 1995, A conceptual review of regional-scale controls on the composition of clastic sediments and the co-evolution of continental blocks and their sediments cover: *Journal of Sedimentary Research*, A65, 1-12.
- Critelli, S., 1999, The interplay of lithospheric flexure and thrust accommodation in forming stratigraphic sequences in the southern Apennines foreland basin system. Italy: *Lincei Scienze Fische e Naturali, Rendiconti, Series IX*, 10, 257-326.
- Critelli, S., Le Pera, E., 1995, Tectonic evolution of the Southern Apennines Thrust-Belt (Italy) as Reflected in Modal Compositions of Cenozoic Sandstone: *Journal of Geology*, 103, 95-105.
- Critelli, S., Marsaglia, K.M., Busby-Spera, C., 2002, Tectonic history of a Jurassic backarc-basin sequence (the Gran Cañon Formation, Cedros Island, Mexico), based on compositional modes of tuffaceous deposits: *Geological Society of America Bulletin*, 114, 515-527.
- DeCelles, P.G., Hertel, F., 1989, Petrology of fluvial sands from the Amazonian foreland basin, Peru and Bolivia: *Geological Society of America Bulletin*, 101, 1552-1562.
- Dickinson, W.R., 1970, Interpreting detrital modes of graywacke and arkose: *Journal of Sedimentary Petrology*, 40, 695-707.
- Dickinson, W.R., Suczek, C., 1979, Plate tectonics and Sandstone Compositions: *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 63, 2164-2182.
- Dickinson, W.R., Beard, L.S., Brakenridge, G.R., Erjaves, J.L., Ferguson, R.C., Inman, K.F., Knapp, R.A., Lindberg, F.A., Ryberg, P.T., 1983, Provenance of North American Phanerozoic sandstones in relation to tectonic setting: *Geological Society of America Bulletin*, 94, 222-235.
- Dowe D. S., 2004, Deformational history of the Granjeno Schist near Ciudad Victoria, México: Ohio, United States of America, Ohio University, tesis de maestría, 108 p.
- Egozcue, J. J., Pawlowsky-Glahn, V., Mateu-Figueraz, G. Barceló-Vidal, C., 2003, Isometric logratio transformations for compositional data analysis: *Mathematical Geology*, 35, 279-300.
- Eguiluz de Antuñano, S., 1990, La Formación Carbonera y sus implicaciones tectónicas, Estados de Coahuila y Nuevo León: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 51, 1-37.
- 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: Tulsa, Oklahoma, American Association of Petroleum Geologists*, 241-270.
- Fortunato, K.S., 1982, Depositional framework of the La Casita Formation (Upper Jurassic-lowermost Cretaceous) near Saltillo, Coahuila, Mexico: New Orleans, University of New Orleans, tesis de maestría, 198 p.
- Fortunato, K.S., Ward, W.C., 1987, Upper Jurassic-Lower Cretaceous fan-delta complex: La Casita Formation of the Saltillo area, Coahuila, Mexico: *Transactions of the Gulf Coast Association of Geological Societies*, 32, 473-482.
- Friedman, G.M., 1971, Staining, *en* Carver, R. E. (ed.), *Procedures in Sedimentary Petrology: New York*, Wiley-Interscience, 511-530.
- Gabriel, K.R., 1971, The biplot graphic display of matrices with application to principal component analysis: *Biometrika*, 58, 453-467.
- Garzanti, E., Vezzoli, G., 2003, A classification of metamorphic grains in sands based on their composition and grade: *Journal of Sedimentary Research*, 73, 830-837.
- Garzanti, E., Vezzoli, G., Ando, S., Castiglioni, G., 2001, Petrology of Rifted-Margin Sand (Red Sea and Gulf of Aden, Yemen): *The Journal of Geology*, 109, 277-297.
- Garzanti, E., Ando, S., Vezzoli, G., Dell'Era, D., 2003, From rifted margins to foreland basins: investigating provenance and sediment dispersal across desert Arabia (Oman, U.A.E.): *Journal of Sedimentary Research*, 73, 572-588.
- Goldhammer, R.K., 1999, Mesozoic sequence stratigraphy and paleogeographic evolution of northeast Mexico, *en* Bartolini C., Wilson, J. L., Lawton, T.F. (eds.), *Mesozoic Sedimentary and Tectonic history of North-Central Mexico: Geological Society of America Special Paper*, 340, 1-58.
- Goldhammer, R.K., Johnson, C.A., 2001, Middle Jurassic - Upper Cretaceous paleogeographic evolution and sequence-stratigraphic framework of the northwest Gulf of Mexico rim, *en* Bartolini, C., Buffler, R.T., Cantú-Chapa, A., (eds.), *The western Gulf of Mexico Basin: Tectonics, sedimentary basins, and petroleum systems: American Association of Petroleum Geologists Memoir*, 75, 45-81.
- González-Acebrón, L., Arribas, J., Mas, R., 2007, Provenance of fluvial sandstones at the start of Late Jurassic-Early Cretaceous rifting in the Cameron Basin (N. Spain): *Sedimentary Geology*, 202, 138-157.
- Graham S.A., Ingersoll R.V., Dickinson W.R., 1976, Common provenance for lithic grains in Carboniferous sandstone from Ouachita Mountains and Black Warrior basin: *Journal of Sedimentary Petrology*, 46, 233-249.
- Gursky, H.J., Michalzik, D., 1989, Lower Permian Turbidites in the Northern Sierra Madre Oriental: *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie, Teil I*, (5/6), 821-838.
- Haenggi, W.T., Muehlberger, W.R., 2005, Chihuahua trough: A Jurassic pull-apart basin, *en* Anderson, T.H., Nourse, J.A., McKee J.W., Steiner M.B. (eds.), *The Mojave-Sonora Megashar Hypothesis: Development, Assessment, and Alternatives: Geological Society of America Special Paper*, 393, 619-630.
- Haq, B.U., Hardenbol, J. Vail, P.R., 1987, Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic: *Science*, 235, 1156-1166.
- Hiscott, R.N., 1978, Provenance of Ordovician deep-water sandstones, Tourelle Formation, Quebec, and implications for initiation of the Taconic orogeny: *Canadian Journal Earth Science*, 15, 1579-1597.
- Humphrey, W.E., 1954, Stratigraphy of the Cortinas Canyon Section, Sierra de Los Muertos, Coahuila, Mexico, *en* Díaz, T., (ed.), *Twenty First Field Trip Guide Book: South Texas Geological Society*, 89-176.
- Imlay, R.W., 1936, Evolution of the Coahuila Peninsula, Mexico, part IV, Geology of the western part of the Sierra de Parras: *Geological Society of America Bulletin*, 47, 1091-1152.

- Imlay, R., 1940, Neocomian faunas of northern Mexico: Geological Society of America Bulletin, 51, 117-190.
- Ingersoll, R.V., Suczek C.A., 1979, Petrology and provenance of Neogene sand from Nicobar and Bengal fans, DSDP sites 211 and 218: Journal of Sedimentary Research, 49, 1217-1228.
- Jenchen, U., 2007, La Popa Basin, NE Mexico: an Analog for Near Salt Deformation and Hydrocarbon Trapping: Guide Book for Field Trip to the La Popa Basin, 60 p.
- Johnson, M.J., 1993, The system controlling the composition of clastic sediments, *en* Johnson, M.J., Basu, A. (eds.), Processes controlling the composition of Clastic Sediments: Geological Society of America Special Paper, 284, 1-19.
- Jones, N.W., McKee, J.W., Márquez, D.B., Tovar, J., Long, L.E., Laudon, T.S., 1984, The Mesozoic La Mula Island, Coahuila, México: Geological Society of America Bulletin, 95, 1226-1241.
- Jones, N.M., McKee, J.W., Anderson, T.H., Silver, L.T., 1995, Jurassic volcanic rocks in northeastern Mexico: A possible remnant of a cordilleran magmatic arc, *en* Jaques-Ayala, C., González-León, C.M., Roldán Quintana, J., (eds.), Studies on the Mesozoic of Sonora and adjacent areas: Geological Society of America Special Paper, 301, 179-190.
- Keppie J.D., 2004, Terranes of Mexico revisited: A 1.3 Billion Year Odyssey: International Geology Review, 46, 765-794.
- Krutak, P.R., 1965, Source areas of the Patula Arkose (Lower Cretaceous) Coahuila, Mexico: Journal of Sedimentary Petrology, 35, 512-518.
- Lehmann, C., Osleger, D.A., Montañez, I.P., Sliter, W., Arnaud-Vanneau, A., Banner, J., 1999, Evolution of Cupido and Coahuila carbonate platforms, Early Cretaceous, northeastern Mexico: Geological Society of America Bulletin, 111, 1010-1029.
- Mack, G., 1984, Exceptions to the relationship between plate tectonics and sandstone composition: Journal of Sedimentary Petrology, 54, 0212-0220.
- Marsaglia, K.M., 1991, Provenance of sand and sandstone from a rifted continental arc Gulf of California, Mexico, *en* Fisher R., Smith G. A. (eds), Sedimentation in Volcanic Settings: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication, 45, 237-248.
- Marsaglia, K.M., Ingersoll, R.V., Pecker, B.M., 1992, Tectonic evolution of the Japanese islands as reflected in modal compositions of Cenozoic forearc and back-arc sand and sandstone: Tectonics, 11, 1028-1044.
- Marsaglia, K.M., Tazaki, K., 1992, Diagenetic trends in ODP Leg 126 sandstones: Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific results, 126, 125-138.
- Marton, G., Buffler, R.T., 1994, Jurassic reconstruction of the Gulf of México basin: International Geology Review, 36, 545-586.
- Masuch-Oesterreich, D., 2007, A Comprehensive seamless digital elevation model for Mexico based on SRTM Data: Abstracts 20th Colloquium on Latin American Earth Sciences, Kiel, Germany, 175.
- McKee, J.W., Jones, N.W., Long, L.E., 1984, History of recurrent activity along a major fault in northeastern Mexico: Geology, 12, 103-107.
- McKee, J.W., Jones, N.W., Anderson, T.H., 1988, Las Delicias basin: A record of late Paleozoic arc volcanism in northeastern Mexico: Geology, 16, 37-40.
- McKee, J.W., Jones, N.W., Long, L.E., 1990, Stratigraphy and provenance of strata along the San Marcos fault, central Coahuila, Mexico: Geological Society of America Bulletin, 102, 593-614.
- McKee, J.W., Jones, N.W., Anderson, T.H., 1999, Late Paleozoic and early Mesozoic history of the Las Delicias terrane, Coahuila, México, *en* Bartolini, C., Wilson, J.L., Lawton, T.F. (eds.), Mesozoic Sedimentary and Tectonic History of North-Central México: Geological Society of America Special Paper, 340, 161-189.
- Michalzik, D., 1988, Trias bis tiefste Unter-Kreide der nordöstlichen Sierra Madre Oriental, Mexico: Fazielle Entwicklung eines passiven Kontinentalrandes: Darmstadt, Deutschland, Technischen Hochschule Darmstadt, tesis doctoral, 247 p.
- Michalzik, D., 1991, Facies sequence of Triassic-Jurassic red beds in the Sierra Madre Oriental (NE Mexico) and its relations to the early opening of the Gulf of Mexico: Sedimentary Geology, 71, 243-259
- Michalzik, D., Schumann, D., 1994, Lithofacies relations and palaeology of a Late Jurassic to Early Cretaceous fan delta to shelf depositional system in the Sierra Madre Oriental of north-east Mexico: Sedimentology, 41, 463-477.
- Molinaroli, E., Blom M., Basu A., 1991, Methods of provenance determination tested with discriminant function analysis: Journal of Sedimentary Research, 61, 900-908.
- Murillo-Muñetón, G., Dorobek, S.L., 2003, Controls on the Evolution of Carbonate Mud Mounds in the Lower Cretaceous Cupido Formation, Northeastern Mexico: Journal of Sedimentary Research, 73, 869-886.
- Ocampo-Díaz, Y.Z.E., 2007, Evolución sedimentológica y geoquímica del Miembro Arenoso Galeana: Linares, Nuevo León, México, Universidad Autónoma de Nuevo León, tesis de maestría, 276 p.
- Ocampo-Díaz, Y.Z.E., 2011, Implicaciones Tectono-sedimentarias de la intercalaciones clásticas en el límite Jurásico-Cretácico del Noreste de México (Fosa de Monterrey y Cuenca de Sabinas): Linares, Nuevo León, México, Universidad Autónoma de Nuevo León, tesis doctoral, 275 p.
- Ocampo-Díaz, Y.Z.E., 2012, Tectónica sedimentaria del límite Jurásico-Cretácico: Implicaciones tectono-sedimentarias en el límite Jurásico-Cretácico del noreste de México: Saarbrücken, Alemania, Editorial Académica Española, 324 p.
- Ocampo-Díaz Y.Z.E., Jenchen U., Guerrero-Suástegui, M., 2008, Facies y sistemas de depósito del Miembro Arenoso Galeana (Formación Taraises, Cretácico Inferior, NE de México): Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 25, 438-464.
- Okada, H., 1971, Classification of sandstone: analysis and proposal: The Journal of Geology, 79, 509-525.
- Otha, T., Arai, H., 2007, Statistical empirical index of chemical weathering in igneous rocks: A new tool for evaluating the degree of weathering: Chemical Geology, 240, 280-297.
- Patchett, P.J., Ruiz, J., 1987, Nd isotopic ages of crust formation and metamorphism in the Precambrian of eastern and southern Mexico: Contributions to Mineralogy and Petrology, 96, 523-528.
- Pettijohn F.J., Potter, P.E., Siever, R., 1987, Sand and Sandstone: New York, Springer-Verlag, Second Edition, 833 p.
- Pindell, J.L., Dewey, J.F., 1982, Permo-Triassic reconstruction of western Pangea and the evolution of the Gulf of Mexico/Caribbean region: Tectonics, 1, 179-211.
- Pindell, J., Kennan, L., 2002, Exploration Framework Atlas Series, Volume 4: Mexico and Gulf of Mexico: London, Tectonic Analysis, 200 p.
- Reyment, R.A., 1999, Multivariate statistical analysis of geochemical data exemplified by Proterozoic dyke swarms in Sweden: GFF (Geological Society of Sweden Journal), 121, 49-55.
- Ricci-Lucchi, F., 1985, Influence of transport processes and basin geometry on sand composition, *en* Zuffa, G.G. (ed.), Provenance of Arenites: Dordrecht, The Netherlands, D. Reidel Publishing Company, 309-332.
- Salvador, A., 1987, Late Triassic-Jurassic paleogeography and origin of Gulf of Mexico basin: The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 71, 419-451.
- Salvador, A., 1991, Origin and development of the Gulf of Mexico basin, *en* Salvador, A. (ed.), The Gulf of Mexico basin: Geological Society of America, Geology of North America, J, 389-444.
- Shaw, P.J.A., 2003, Multivariate statistics for the Environmental Sciences: Oxford, London, Hodder-Arnold, 446 p.
- Suttner, L.J., Basu, A., Mack, G.H., 1981, Climate and the origin of Quartz arenites: Journal of Sedimentary Petrology, 51, 1235-1246.
- Tolosana-Delgado, R., Otero, N., Pawlowsky-Glahn, V., Soler, A., 2005, Latent compositional factors in the Llobregat River basin (Spain) hydrogeochemistry: Mathematical Geology, 37, 681-702.
- Tortosa, A., Palomares, M., Arribas, J., 1991, Quartz grain types in Holocene deposits from the Spanish Central System: some problems in provenance analysis, *en* Morton, A. C., Todd, S. P., Haughton, P. D.W. (eds.), Developments in Sedimentary Provenance Studies, Geological Society Special Publication, 57, 47-54.
- Valloni, R., 1985, Reading provenance from Modern sands, *en* Zuffa, G. G. (ed.), Provenance of Arenites: Dordrecht, The Netherlands, D. Reidel Publishing Co., 309-332.

- Vokes, H.E., 1963, Geology of the Cañón de la Huasteca area in the Sierra Madre Oriental, Nuevo Leon, Mexico: *Tulane Studies in Geology*, 1, 125-148.
- von Eynatten, H., Barceló-Vidal, C., Pawlowsky-Glahn, V., 2003, Modelling compositional change: the example of chemical weathering of granitoid rocks: *Mathematical Geology*, 35, 231-251.
- Weltje, G.J., 2002, Quantitative analysis of detrital modes: statistically rigorous confidence regions in ternary diagrams and their use in sedimentary petrology: *Earth-Science Reviews*, 57, 211-253.
- Weltje, G.J., Meijer, X.D., De Boer, P.L., 1998, Stratigraphic inversion of siliciclastic basin fills: a note on the distinction between supply signals resulting from tectonic and climatic forcing: *Basin Research*, 10, 129-153.
- Wilson, J.L., 1990, Basement structural controls on Mesozoic carbonate facies in Northeastern México.- a review, *en* *Contribuciones al Cretácico de México y América Central: Actas de la Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León, Linares, Nuevo León, México*, 4, 5-45.
- Young, S.W., 1976, Petrographic textures of detrital polycrystalline quartz as an aid to interpreting crystalline source rocks: *Journal of Sedimentary Petrology*, 46, 595-603.
- Zuffa, G.G., 1980, Hybrid arenites: Their composition and classification: *Journal of Sedimentary Petrology*, 18, 21-29.
- Zuffa, G.G., Gaudio, W., Rovito, S., 1980, Detrital mode evolution of the rifted continental-margin Longobucco sequence (Jurassic), Calabrian Arc, Italy: *Journal of Sedimentary Petrology*, 50, 51-61.

Manuscrito recibido: Noviembre 20, 2012.

Manuscrito corregido recibido: Febrero 10, 2013.

Manuscrito aceptado: Marzo 15, 2013.