

GEOLOGÍA DE LA SIERRA DE SAN CARLOS – CRUILLAS: UNA HISTORIA DIGNA DE CONTARSE

Juan Alonso Ramírez-Fernández^{1,2,*}, Víctor Alejandro Leal-Cuellar^{2,3},
Luis Alejandro Elizondo-Pacheco⁴, Fernando Velasco-Tapia¹ & Pedro Rodríguez-Saavedra¹

¹ Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias de la Tierra, Linares, N.L. 67700, México

² Clúster Académico de la Región Mezcalera Sierra de San Carlos, Tamaulipas

³ Universidad Autónoma de Nuevo León, Posgrado de la Facultad de Ciencias de la Tierra, Linares, N.L. 67700, México

⁴ Universidad Nacional Autónoma de México, Posgrado en Ciencias de la Tierra, Centro de Geociencias, Juriquilla, Querétaro, 76230, México

* juan.ramirezfn@uanl.edu.mx

Resumen

La Sierra de San Carlos-Cruillas ubicada en el estado de Tamaulipas es un complejo geológico compuesto por unidades sedimentarias del Mesozoico que fueron primeramente plegadas y posteriormente emplazadas por rocas magmáticas alcalinas plutónicas, subvolcánicas y volcánicas del Cenozoico. Las rocas sedimentarias son calizas, margas, y lutitas, y de manera subordinada areniscas y cenizas volcánicas. Entre las rocas magmáticas destacan monzodioritas, gabros, sienitas, sienitas nefelínicas, basanitas, fonotefritas, basaltos alcalinos y lamprófidos alcalinos. Las unidades magmáticas son: (a) Sierra de San Carlos o Sierra Chiquita, (b) Sierras Bajas, (c) Complejo Hipabisal San Lázaro (d) Bufa del Diente, (e) Campo Subvolcánico de Burgos y (f) San Miguel. La Sierra de San Carlos-Cruillas es muy importante por su riqueza geológica, económica, histórica, biológica y turística que la hace una joya natural no solo de Tamaulipas, sino de México.

Palabras clave

Provincia Alcalina Oriental de México, Magmatismo Cenozoico, Manto Terrestre, Fusión Parcial, Geoturismo

Abstract

The Sierra de San Carlos-Cruillas, located in the state of Tamaulipas, is a geological complex composed of slightly folded Mesozoic sedimentary units that were subsequently emplaced by alkaline plutonic, subvolcanic, and volcanic rocks of the Cenozoic. The sedimentary rocks are limestone, marl, shale, and subordinately sandstone and volcanic ash. Among the magmatic rocks, monzodiorites, gabbros, syenites, nepheline syenites, basanites, phonotephrites, alkaline basalts, and alkaline lamprophytes stand out. The magmatic units are: (a) Sierra de San Carlos or Sierra Chiquita, (b) Sierras Bajas, (c) San Lázaro Hypabyssal Complex, (d) Bufa del Diente, (e) Burgos Subvolcanic Field and (f) San Miguel. The Sierra de San Carlos-Cruillas is very important for its geological, economic, historical, biological, and tourist interest, making it a natural treasure of Tamaulipas and Mexico.

Ramírez-Fernández, J.A., Leal-Cuellar, V.A., Elizondo-Pacheco, L.A., Velasco-Tapia, F. & Rodríguez-Saavedra, P. (2023): Geología de la Sierra de San Carlos – Cruillas: Una Historia digna de contarse. – en: Montalvo Arrieta, J.C., Ramírez Fernández, J.A., Aguilar-Madera, C.G., Jenchen, U., Salinas Jasso, J.A., Velasco-Tapia, F. & Navarro-de León, I. (eds.): Número especial en conmemoración del 90° Aniversario de la Universidad Autónoma de Nuevo León y del 40° Aniversario de la Facultad de Ciencias de la Tierra. – Actas de la Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL, Linares, **9 (2023)**: 121-133.

Keywords

Eastern Mexican Alkaline Province, Cenozoic Magmatism, Earth's Mantle, Partial Melting, Geotourism

Introducción

El estado de Tamaulipas presenta una importante riqueza geomorfológica, que va de la mano del desarrollo de sus provincias geológicas. Destaca por supuesto la impresionante cadena montañosa plegada y cabalgada de la Sierra Madre Oriental, con sus imponentes cimas y sus profundos cañones que permiten el acceso a vestigios de ancestrales tiempos geológicos. Adicionalmente cuenta con amplias llanuras, que bajo ellas se albergan potentes secuencias sedimentarias que ostentan una gran riqueza energética en la denominada Cuenca de Burgos. Por otra parte, en su región central se localiza el Anticlinorio de Tamaulipas, que representa un gran pliegue regional, orientado norte a sur y en cuyas culminaciones norte y sur se ubican la Sierra de San Carlos-Cruillas y la Sierra de Tamaulipas respectivamente. En ambos casos se trata de anticlinales suaves, conformados por rocas calcáreo-arcillosas del Cretácico Inferior al Superior, que fueron intrusionados en el Cenozoico por cuerpos plutónicos y bordeados por campos subvolcánicos y volcánicos. Esta contribución se dirige en particular a la historia geológica de la Sierra de San Carlos-Cruillas (SSCC).

La SSCC es un complejo geológico localizado en la parte centro occidental del estado de Tamaulipas, a 90 km al NE de Ciudad Victoria y a 60 km al SE de Linares, Nuevo León. Abarca parte de los municipios de San Carlos, San Nicolás, Burgos, Cruillas y Villagrán. Este complejo es muy importante desde el punto de vista geológico, económico, histórico y cultural.

El desarrollo de la SSCC abarca un prolongado lapso geológico, que dio inicio en el Pérmico-Triásico (250 – 200 Ma), con el emplazamiento de cuerpos plutónicos granítico-granodioríticos, los cuales formarían el basamento cristalino sepultado de la SSCC (Coombs et al., 2021). Estos cuerpos no afloran y solamente se conocen por profundas perforaciones. Durante gran parte de la era Mesozoica esta región estuvo sumergida bajo las aguas de las etapas incipientes del Golfo de México, que llevaron a la depositación de rocas sedimentarias carbonatadas y arcillosas que formarían la secuencia sedimentaria de la SSCC (Márquez-Domínguez, 1970). Durante el Cretácico Superior y principios del Paleógeno ocurrió el evento de deformación laramídica que levantó y plegó las secuencias sedimentarias que conforman el Cinturón de Pliegues y Cabalgaduras Mexicano incluyendo la Sierra Madre Oriental (Fitz-Díaz et al., 2018). A la par las rocas sedimentarias de la región de la Sierra de San Carlos-Cruillas fueron levantadas y plegadas dando lugar a la parte norte del Anticlinorio de Tamaulipas.

Mas tarde, a partir del Eoceno (~40 Ma) ocurrió el emplazamiento de diversos cuerpos magmáticos alcalinos que conformaron el complejo magmático de la Sierra de San Carlos-Cruillas. Esta actividad culminó en el Pleistoceno (~0.5 Ma). Asociados a estos cuerpos magmáticos se generaron yacimientos de minerales metálicos en las regiones de San José y de San Nicolas, que motivaron el desarrollo histórico y económico de la región. A continuación, se dará una explicación más amplia de los principales rasgos geológicos de la SSCC y su desarrollo y evolución en el tiempo.

Marco Geológico Regional

El noreste de México, en particular el estado de Tamaulipas, tiene una historia geológica muy larga y diversa, aquí se pueden atestiguar eventos geológicos que se desarrollaron desde el Precámbrico hasta el Cenozoico. Entre estos sucesos destacan eventos metamórficos en el Precámbrico (p. ej. Alemán-Gallardo et al., 2019a) y Carbonífero (p. ej. Barboza-Gudiño et al., 2011); eventos magmáticos durante el Ordovícico (p. ej. Alemán-Gallardo et al., 2019b), Carbonífero (p. ej. Ramírez-Fernández et al., 2021), Pérmico-Triásico (p. ej. Coombs et al., 2021), Jurásico (p. ej. Fastovsky et al., 2005), Cretácico (p. ej. Fitz-Díaz et al., 2018) y Cenozoico (p. ej. Nick, 1988; Ramírez-Fernández, 1996; Treviño-Cázares et al., 2005; Viera-Décida et al., 2009; Elizondo-Pacheco et al., 2022); desarrollo de cuencas sedimentarias en el Paleozoico (p. ej. Casas-Peña et al., 2021), Cretácico (p. ej. Murray et al., 2019; Eguiluz de Antuñano, 2001) y Cenozoico (p. ej. Pérez-Cruz, 1992; Eguiluz de Antuñano, 2011a); así como eventos de deformación que plegaron y/o levantaron la cobertura sedimentaria, el basamento y algunos cuerpos magmáticos (p. ej. Fitz-Díaz et al., 2018).

Sin embargo, en la región que comprende a la Sierra de San Carlos-Cruillas la historia geológica inicia con el emplazamiento de plutones graníticos durante el Pérmico-Triásico que forman el basamento cristalino de la región (López-Ramos, 1979; Coombs et al., 2021). El origen de estas rocas está relacionada a la subducción de la placa oceánica de Panthalassa bajo de Pangea (Keppie, 2004; Ortega-Obregón et al., 2014).

Posteriormente, durante el Mesozoico se depositaron grandes espesores de sedimentos marinos sobre este basamento cristalino expuesto en aquel entonces, que dio origen a las formaciones sedimentarias que actualmente componen la secuencia estratigráfica de la SSCC.

En el noroeste de México, en Nuevo León, Coahuila y en la parte occidental de Tamaulipas, esta secuencia sedimentaria fue

deformada durante el Cretácico Superior y el Paleógeno que dieron origen al Cinturón de Pliegues y Cabalgaduras Mexicano (Fitz-Díaz et al., 2018). Sin embargo, esta estructura se corta abruptamente a lo largo de la cabalgadura frontal de la Sierra

Madre Oriental (Chávez-Cabello, 2005). Más al oriente se ha reconocido una estructura regional que forma un anticlinal suave que conecta la SSCC con la Sierra de Tamaulipas, denominada Anticlinorio de Tamaulipas.

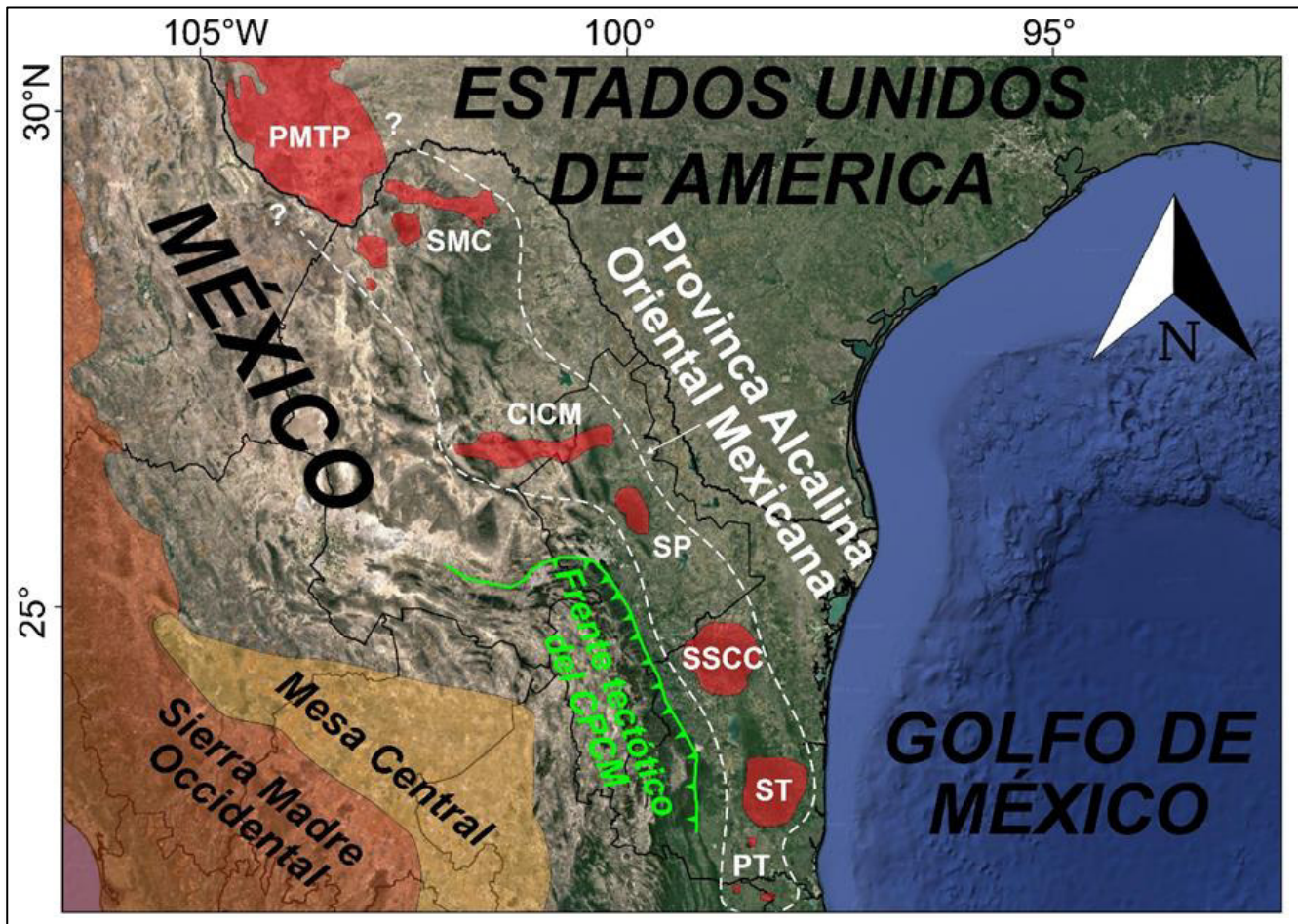


Figura 1: Sobrevista general de los elementos geológicos del NE de México, así como de la distribución de los complejos magmáticos que conforman a la Provincia Alcalina Oriental de México (campos rojos englobados dentro de las líneas punteadas blancas). Abreviaturas: CPCM: Cinturón de Pliegues y Cabalgaduras, PMTTP: Provincia Magmática Trans-Pecos, PT: Planicie de Tampico, SMC: Sierras Maderas del Carmen, SP: Sierra de Picachos, SSCC: Sierra de San Carlos-Cruillas, ST: Sierra de Tamaulipas. Modificado de Leal-Cuellar et al. (2023).

Más tarde, durante el Cenozoico se emplazaron cuerpos magmáticos plutónicos, subvolcánicos que conforman el complejo magmático de la SSCC (Rodríguez-Saavedra, 2003). Cabe mencionar que la SSCC pertenece a la Provincia Alcalina Oriental Mexicana (PAOM; Figura 1) descrita por primera vez por Demant & Robin (1975). Esta provincia se compone de complejos magmáticos alineados en una orientación NNW-SSE a lo largo de la Planicie Costera del Golfo de México, que se encuentran en diferentes localidades de los estados de Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas. Estos cuerpos ígneos presentan un carácter geoquímico predominantemente alcalino y edades que varían desde el Eoceno hasta el Pleistoceno (Bloomfield &

Cépeda-Dávila, 1973; Camacho-Angulo, 1993; Viera-Décida et al., 2009; Poliquin, 2009).

Geología de la Sierra de San Carlos-Cruillas

Estratigrafía

Las unidades litológicas más antiguas de la región corresponden a formaciones sedimentarias que se ubican sobre todo en los cañones de la denominada Sierra Chiquita, parte central de la SSCC. Sin embargo, el registro más antiguo que se tiene es a partir del Jurásico (de la Fuente-García, 1976) cuando las aguas marinas del proto Golfo de México cubrieron los

grandes cuerpos graníticos del Permo-Triásico que se encontraban expuestos formando lo que ahora se conoce como Isla de San Carlos del Arco de Tamaulipas, que solamente se conoce de profundas perforaciones.

De esta forma, la secuencia estratigráfica expuesta de la SSCC está conformada por una columna de más de 1 km de espesor (Ramírez-Fernández, 1989) de rocas calcáreo-arcillosas

con un rango de edad desde el Cretácico Inferior al Cretácico Superior que forma parte de la Cuenca Tampico-Misantla (SGM, 2004). Sin embargo, en la parte norte, también podemos encontrar cuerpos magmáticos emplazados en las rocas detríticas del Paleógeno de la Cuenca de Burgos (Pérez-Cruz, 1992; Eguiluz de Antuñano, 2011b). En la Figura 2 se muestra el mapa geológico de la SSCC.

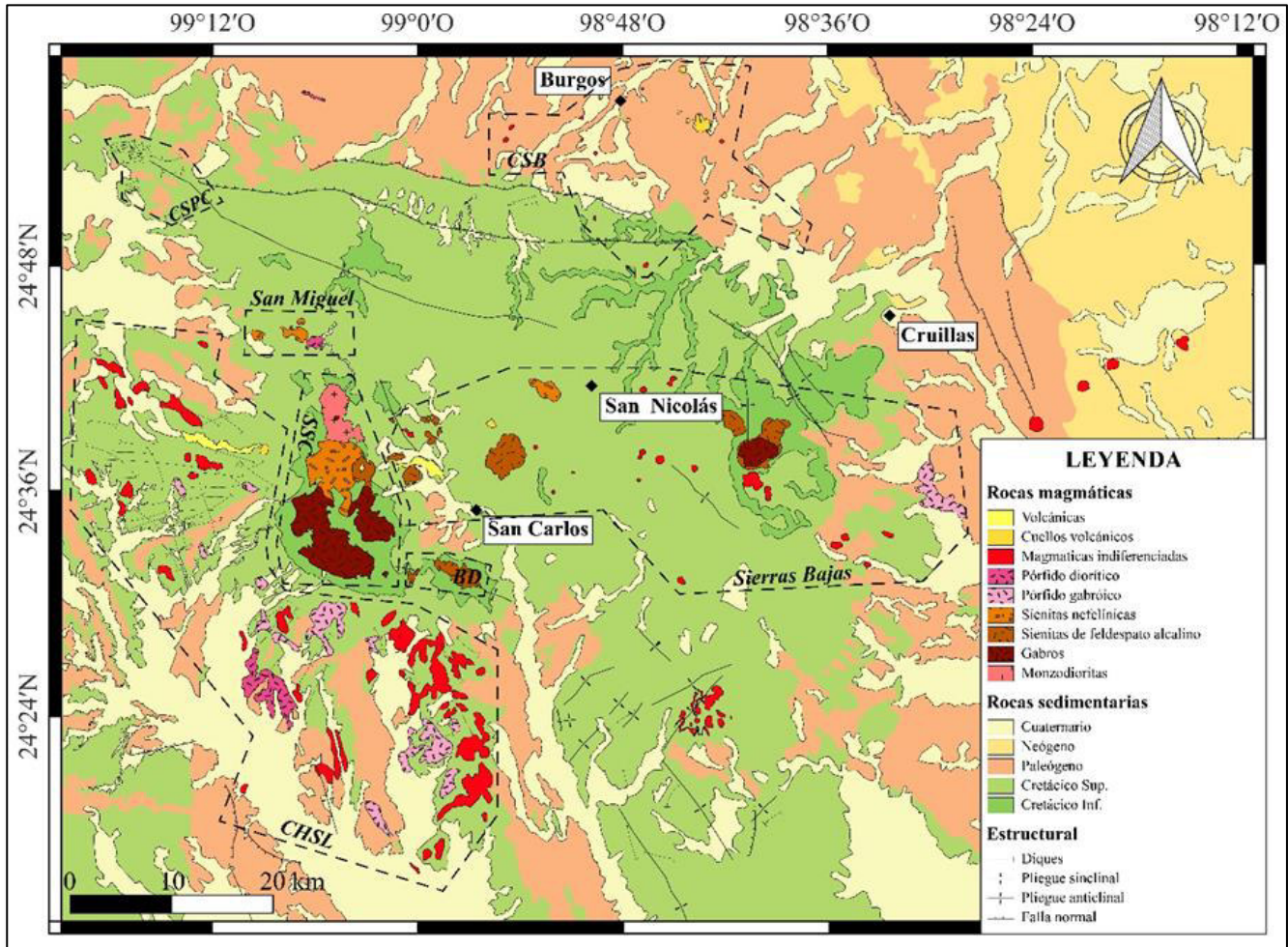


Figura 2: Mapa geológico de la SSCC (modificado de Leal-Cuellar et al., 2023). Debido a la distribución de algunas de las formaciones sedimentarias, estas se organizaron de acuerdo a la edad: Cretácico Inf. engloba a la Fm. Tamaulipas Inferior y la Fm. Otates; Cretácico Sup. abarca a la Fm. Tamaulipas Superior, Fm. Cuesta del Cura, Fm. Agua Nueva, Fm. San Felipe y Fm. Méndez; Paleógeno este engloba a la Fm. Midway, Fm. Wilcox, Fm. Carrizo, Fm. Big Ford, Fm. Pico Clay, Fm. Yegua, Fm. Jackson, Fm. Vicksburg y la Fm. Frío; Neógeno engloba a la Fm. Catahoula, Fm. Oakville, Fm. Providencia y Fm. Reynosa (SGM, 2004; Eguiluz de Antuñano, 2011).

La secuencia estratigráfica aflorante inicia con la Formación (Fm.) Tamaulipas Inferior del Hauteriviano hasta el Aptiano Superior (Figura 3). Esta unidad está compuesta por calizas micríticas de color gris en estratos muy gruesos (70-100 cm) con intercalaciones de lutitas (de la Fuente-García, 1976). Sobreyaciendo de forma concordante se depositaron calizas arcillosas de la Fm. Otates del Aptiano Superior. Esta unidad está representada por calizas arcillosas café rojizo, interestratificada

con calizas menos arcillosas grises. En la SSCC, esta formación no sobrepasa los 20 m. de espesor total (de la Fuente-García, 1976; Ramírez-Fernández, 1992). La Fm. Tamaulipas Superior (Figura 4a) del Albiano se encuentra sobreyaciendo de manera concordante a la Fm. Otates. Esta unidad está constituida por calizas micríticas con foraminíferos del género *Hedbergella sp.*, y su espesor total alcanza los 80 m (Ramírez-Fernández, 1992). La Fm. Cuesta del Cura tiene una edad de la parte superior del

Albiano hasta el Cenomaniano. Está compuesta por calizas micríticas grises con estratificación ondulosa y con un gran contenido de pedernal en bandas y lentes de hasta 15 cm de espesor, las calizas son muy heterogéneas por la presencia de laminaciones muy claras por fragmentos fósiles, principalmente crinoideos, amonites y belemnites (Ramírez-Fernández, 1992). La transición a la Fm. Agua Nueva, del Cenomaniano al Turoniano, está marcada por la aparición de calizas arcillosas laminares de estratificación mediana a gruesa de color gris, con alternancia de margas y lutitas de color café a gris (de la Fuente-

García, 1976; Ramírez-Fernández, 1992). Con una edad del Coniaciano-Santoniano Inferior, la Fm. San Felipe (Figura 4b) se compone de calizas arcillosas, en alternancia con margas y lutitas que intemperizan en color amarillento, acompañados de algunos estratos vulcano-sedimentarios (Ramírez-Fernández, 1992). El contacto con la Fm. Méndez, del Campaniano-Maastrichtiano, es concordante y transicional, esta unidad está compuesta por lutitas y margas de color café a verdoso casi sin estratificación (Ramírez-Fernández, 1992).

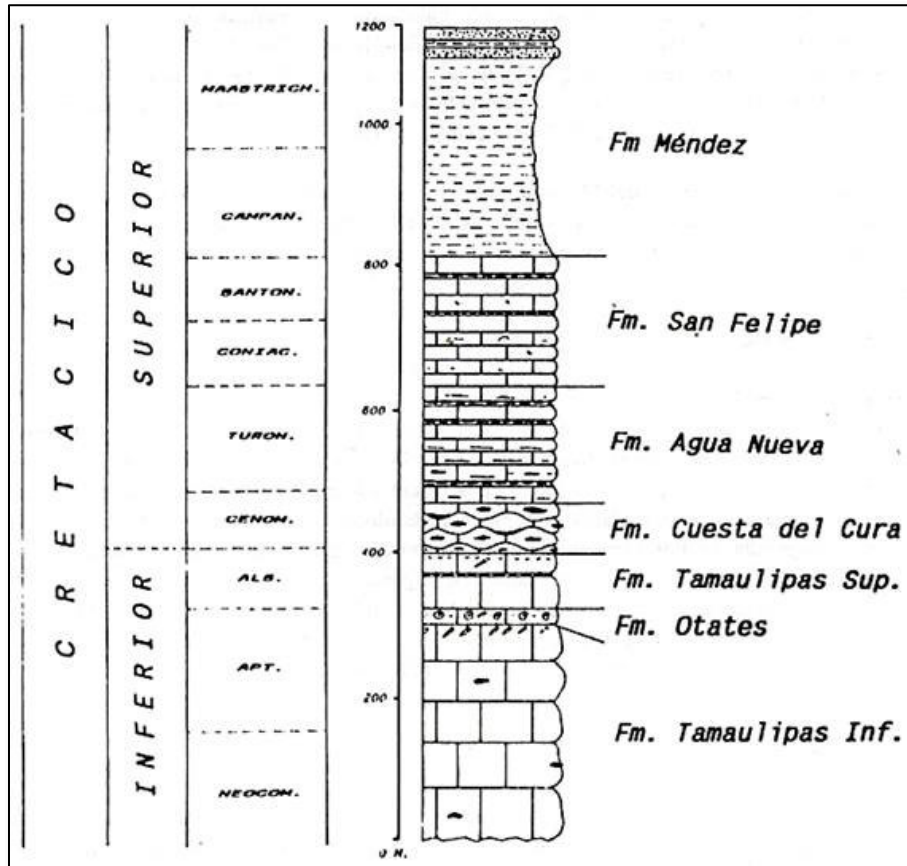


Figura 3: Columna estratigráfica simplificada del Mesozoico de la Sierra de San Carlos-Cruillas (Ramírez-Fernández, 1992).

Una particularidad importante en la columna sedimentaria es la presencia de sedimentos generados (Figura 4c) por el tsunami producido por el impacto del meteorito que formó el cráter Chicxulub en lo que ahora es la península de Yucatán. Este impacto pudo haber sido la causa fundamental de la extinción de organismos como los dinosaurios y amonites hace ~66 Ma, en el límite Cretácico-Terciario o Cretácico-Paleógeno. Estas areniscas separan a la Fm. Méndez del Cretácico Tardío de la Fm. Velasco del Paleoceno en la localidad El Mulato, al norte de la SSCC.

La Fm. Velasco (Figura 4d), está constituida por una secuencia rítmica de lutitas y areniscas calcáreas de color gris

verdoso a amarillento con coquinas contiene fósiles como gasterópodos, lamelibrancios diminutos, equinodermos y ostreas (SGM, 2004). En algunas localidades cuerpos ígneos en forma de sills intrusieron en esta formación.

Rocas Magmáticas de la SSCC

Una de las más importantes particularidades de la SSCC es su registro magmático, representado por cuerpos plutónicos, subvolcánicos y volcánicos del Cenozoico. La actividad magmática ha sido dividida en seis partes principales (Figura 2): (a) Sierra de San Carlos o Sierra Chiquita, (b) Sierras Bajas, (c) Complejo Hipabisal San Lázaro (d) Bufa del Diente, (e) Campo

Subvolcánico de Burgos y (f) San Miguel (Leal-Cuellar, 2020; Elizondo-Pacheco et al., 2022). Esta actividad inició con plutonismo durante el Eoceno (~ 40 Ma) con el emplazamiento de monzodioritas en el área de San José con supuesta firma de arco continental, posteriormente durante el Oligoceno por gabros

y sienitas de feldespato alcalino/nefelínicas en un ambiente geotectónico de intraplaca, y se extendió hasta el Mioceno con pequeños derrames basálticos (Bloomfield & Cepeda-Dávila, 1975; Iriondo et al., 2003; Viera-Decida et al., 2009; Poliquin, 2009; Leal-Cuellar et al., 2023).

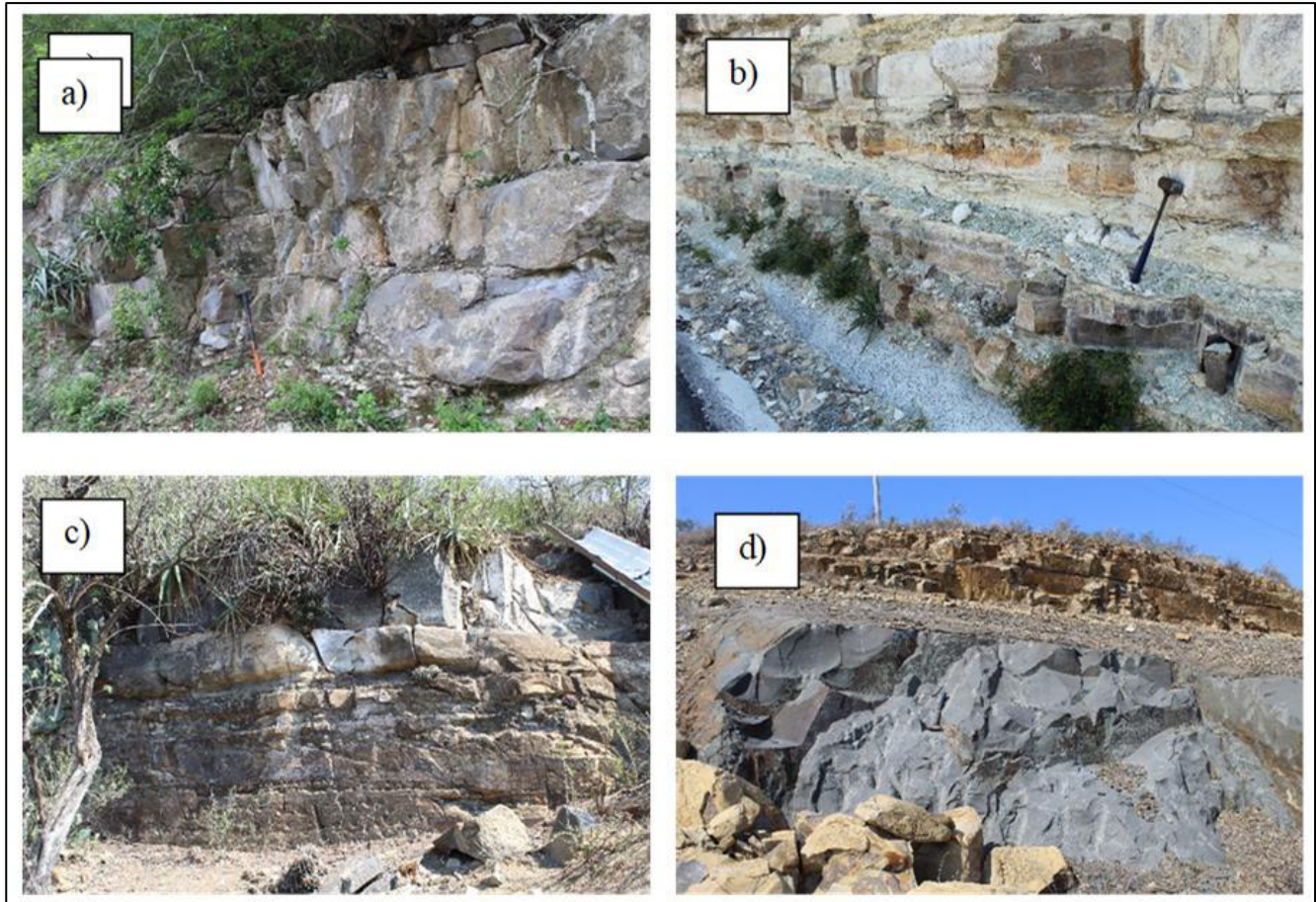


Figura 4: Ejemplos de rocas sedimentarias de la SSCC, (a) Calizas de la Fm. Tamaulipas Superior, San José. (b) Intercalaciones de calizas/lutitas/margas con horizontes verdes de cenizas alteradas de la Fm. San Felipe, Carretera Mulato al Gavilán. (c) Areniscas de impacto meteorítico del límite Cretácico-Paleógeno, El Mulato. (d) Sill de pórfido gabrítico intercalado en la Fm. Velasco del Paleógeno, El Mulato.

Las rocas monzodioríticas (Figura 5a) presentan variaciones composicionales entre monzodiorita, monzonita, cuarzomonzodiorita, con texturas de equigranular a porfírica y se componen de plagioclasa, feldespato alcalino, cuarzo, clinopiroxeno, hornblenda y fases accesorias, como titanita, apatito y el zircón (Nick, 1988; Rodríguez-Saavedra, 2003; Mendoza-Vargas, 2010). En la parte norte de la SSCC, en San José, fechamientos U-Pb en circones proporcionan edades de 38 a 37 Ma (Poliquin, 2009).

Las rocas gabríticas (Figura 5b) aparecen como cumulos gabríticos, gabros de hornblenda y monzogabros, además, es posible apreciar gabros bandeados (Leal-Cuellar, 2018, 2020). Los gabros *sensu stricto* contienen plagioclasa, clinopiroxeno,

olivino y minerales accesorios como el apatito y zircón (Nick, 1988; Rodríguez-Saavedra, 2003). Otra característica particular es que diques de composiciones félsicas y máficas cortan a los intrusivos gabríticos. La edad de estas rocas varía entre los 31 y 33 Ma (Viera-Décida et al., 2009; Leal-Cuellar et al., 2023). Estas se ubican en los alrededores de Rincón Murillo, al sur de la Sierra Chiquita.

Las rocas sieníticas varían entre sienitas de feldespato alcalino (Figura 5c) y sienitas nefelínicas (Figura 5d). Las sienitas nefelínicas tienen composición y textura bastante homogénea, con ortoclasa, nefelina, analcima, clinopiroxeno, titanita, cancrinita y sodalita. En cambio, las sienitas de feldespato alcalino están constituidas por ortoclasas con

desmezclaciones peritíticas, augita egirínica, biotita, hornblenda y minerales accesorios (Nick, 1988; Rodríguez-Saavedra, 2003).

Estas se ubican p. ej. en el arroyo el Bagre, al oeste de la localidad de Marmolejo.



Figura 5: Rocas plutónicas de la SSCC. (a) Rocas monzodioríticas (color rosa) cortadas por un dique máfico en el área de San José. (b) Rocas gabróicas de La Gloria. (c) Sienitas de feldespato alcalino de la localidad de El Rosario. (d) Antigua cantera de sienita nefelínica al fondo del cañón de la localidad el Rosario.

Diferentes tipos de diques y sills se emplazaron entre las rocas plutónicas y las rocas sedimentarias encajonantes, formando cuerpos con texturas porfíricas con matrices feldespáticas y con fenocristales de clinopiroxeno, anfíbol, plagioclasa, sanidino y flogopita y han sido clasificados como pórfidos gabróicos, pórfidos dioríticos, pórfidos sieníticos, pórfidos de sienita nefelínica y lamprófidios alcalinos. Estos últimos son portadores de xenolitos corticales (Figura 6a; Elizondo-Pacheco & Ramírez-Fernández, 2017; Elizondo-Pacheco, 2017, 2019; Elizondo-Pacheco et al., 2022).

En la parte septentrional de la SSCC, alrededor de Burgos, se localizan diversos cuerpos subvolcánicos en forma de cuellos volcánicos caracterizados por formas cónicas que sobresalen del terreno (Figura 6b). Típicamente tienen una textura porfírica con fenocristales de plagioclasa, clinopiroxeno y olivino (Rodríguez-Saavedra, 2003; Treviño-Cázares et al., 2005;

Elizondo-Pacheco et al., 2022). El Cerro San Isidro presenta dos tipos de texturas, en los bordes una textura porfírica fina con fragmentos vítreos de hasta 4 cm de diámetro, por otra parte, el centro presenta una textura de grano medio. La mayoría de estos cuellos volcánicos son portadores de xenolitos peridotíticos del manto los cuales pueden llegar a alcanzar hasta 2 cm de diámetro (Treviño-Cázares et al., 2005).

La etapa final del magmatismo de la SSCC está representada por cuerpos de lava basáltica y fonotefrítica con texturas porfíricas, en las localidades de Marmolejo y Mesa Morteríos, respectivamente (Figura 6c; Nick, 1988; Rodríguez-Saavedra, 2003; Treviño-Cázares et al., 2005). Los componentes principales de la matriz son plagioclasa, clinopiroxeno y magnetita, mientras los fenocristales son de plagioclasa y clinopiroxenos subordinados. Algunos basaltos contienen

xenolitos peridotíticos provenientes del manto (Figura 6d; Rodríguez-Saavedra, 2003; Treviño-Cázares et al., 2005).



Figura 6: (a) Dique lamprofídico alcalino con xenolitos corticales, en San Lázaro. (b) Bloques de basanita del cuello volcánico Cerro el Sarnoso, ubicado al sur de Burgos. (c) Derrame fonotefrítico de la localidad Morteríos. (d) Xenolito del manto (color verde) portados dentro del derrame fonotefrítico de la localidad Morteríos.

Rocas Encajonantes y Metamorfismo de Contacto

Las rocas sedimentarias al ser intrusionadas por pulsos magmáticos a altas temperaturas, reaccionaron formando rocas metamórficas y en ocasiones, cuerpos mineralizados de interés económico.

En la parte sur y la parte central las formaciones sedimentarias calcáreas y arcillosas experimentaron

metamorfismo de contacto dando lugar a mármoles y corneanas. Es posible reconocer la meta-estratificación en estas rocas y en el caso de las corneanas presentan una alta dureza por silicificación. Por otra parte, en el sector norte, la Monzodiorita San José está en contacto con rocas carbonatadas de la Formación Tamaulipas Superior e Inferior, generando skarn de Fe y Cu, con bajas concentraciones de Au, Ag, Zn y Mo (Poliquin, 2009; Mendoza-Vargas, 2010). En algunas zonas se generó mármol con skarn de granate (Figura 7a y 7b).



Figura 7: (a) Mármol con skarn de granate. (b) Bloque de mármol deformado embebido en las rocas gabrómicas de la SSCC.

Modelo Genético de la Provincia Alcalina Oriental Mexicana (PAOM)

Existe poca claridad sobre la generación del magmatismo de la PAOM. Diferentes modelos se han propuesto con el fin de esclarecer y proporcionar una panorámica más precisa acerca de su formación. La PAOM está compuesta por los siguientes complejos: (a) Cinturón Candela Monclova, (b) Sierra de Picachos, (c) Sierra de San Carlos-Cruillas, (d) Sierra de Tamaulipas, (e) Planicie de Tampico y (f) la Sierra de Otontepec. Además, diversos autores (p. ej. Robin, 1982; Ramírez-Fernández et al., 2000; Viera-Décida et al., 2009) han incluido en la PAOM a los complejos Sierra Blanca en Nuevo México, Trans-Pecos en Texas, Intrusivo La Cueva, Macizo de Palma Sola y San Andrés de los Tuxtlas. En primera instancia, Robin & Tournon (1978) propusieron que la PAOM se extiende hasta la región de Trans-Pecos, Texas. Esto debido a la similitud en litologías, rango de edades y ambientes tectónicos inferidos con el resto de las localidades. Sin embargo, no existen trabajos petrológicos posteriores que sustenten dicha prolongación. Por el contrario, la generación de este complejo extensional se ha asociado a la provincia de Cuencas y Sierras (Barker, 1987; James & Henry, 1991). Además, no existe un trabajo petrológico concreto sustentado en datos geoquímicos y geocronológicos que relacionen el magmatismo del Intrusivo La Cueva a la PAOM (Daugherty, 1963). Por otra parte, algunos autores como Robin (1976), Robin & Tournon (1978), postularon que Los Tuxtlas pertenecen a la PAOM ya que los cuerpos se podrían haber emplazado a través de fallas extensionales regionales. Además, Thorpe (1977), Nelson & González-Caver (1992), Gómez-Tuena et al. (2003), Ferrari et al. (2005) y Verma (2006),

relacionan el magmatismo de estos complejos con la subducción de la Placa de Cocos y los consideran como parte del Cinturón Volcánico Transmexicano.

Otro modelo petrogenético propuesto para la formación de la PAOM relaciona el magmatismo a lo largo de la Planicie Costera del Golfo con el nacimiento de una cuenca marginal de la Placa Norteamericana, la cual es equivalente a la cuenca del Colorado y del río Columbia en los Estados Unidos (Demant & Robin, 1975). De esta manera, Robin (1982) propuso el rift del Río Grande en Texas como el mecanismo generador de los procesos de extensión continental los cuales fueron progresando de norte a sur desde el Oligoceno hasta el Holoceno. Sin embargo, en la actualidad se cuentan con estudios geocronológicos que indican que la actividad magmática de la PAOM fue simultánea y no progresiva como este autor señaló.

En contraste con este modelo inicial sobre la génesis de la provincia, otros autores sugirieron que el magmatismo de la PAOM ocurrió en respuesta a la migración del arco magmático situado en la margen pacífico hacia el oriente durante el Eoceno (~50 Ma; Clark et al., 1982; Urrutia-Fucugauchi, 1986; Poliquin, 2009; Viera-Décida et al., 2009). De acuerdo con esta propuesta, el arco llegó a situarse a una distancia de 1,000-1,100 km de la paleotrinchera del Pacífico en el Eoceno (~40 Ma) generando magmatismo tipo subalcalino (calcoalcalino) y alcalino de alto K en el NE de México y un vulcanismo ignimbrítico que dio origen a la Sierra Madre Occidental (SMOc).

A pesar de que este modelo prevaleció por más de cuatro décadas, es importante señalar que este modelo está sustentado en la presencia de rocas con firma tectónica de arco continental en algunos sectores de los diferentes complejos de la PAOM. Sin embargo, Elizondo-Pacheco (2019) señaló que esta firma

presente en las rocas intermedias y ácidas ha sido inferida a partir de los diagramas de clasificación que no son adecuados para las rocas estudiadas (p. ej. Viera-Décida et al., 2009; Poliquin, 2009; Mendoza-Vargas, 2010). Además, Elizondo-Pacheco et al. (2022) postularon que la firma geoquímica tipo arco en estas

rocas podría estar relacionada a la fusión parcial de un manto previamente metasomatizado por eventos antiguos de subducción.

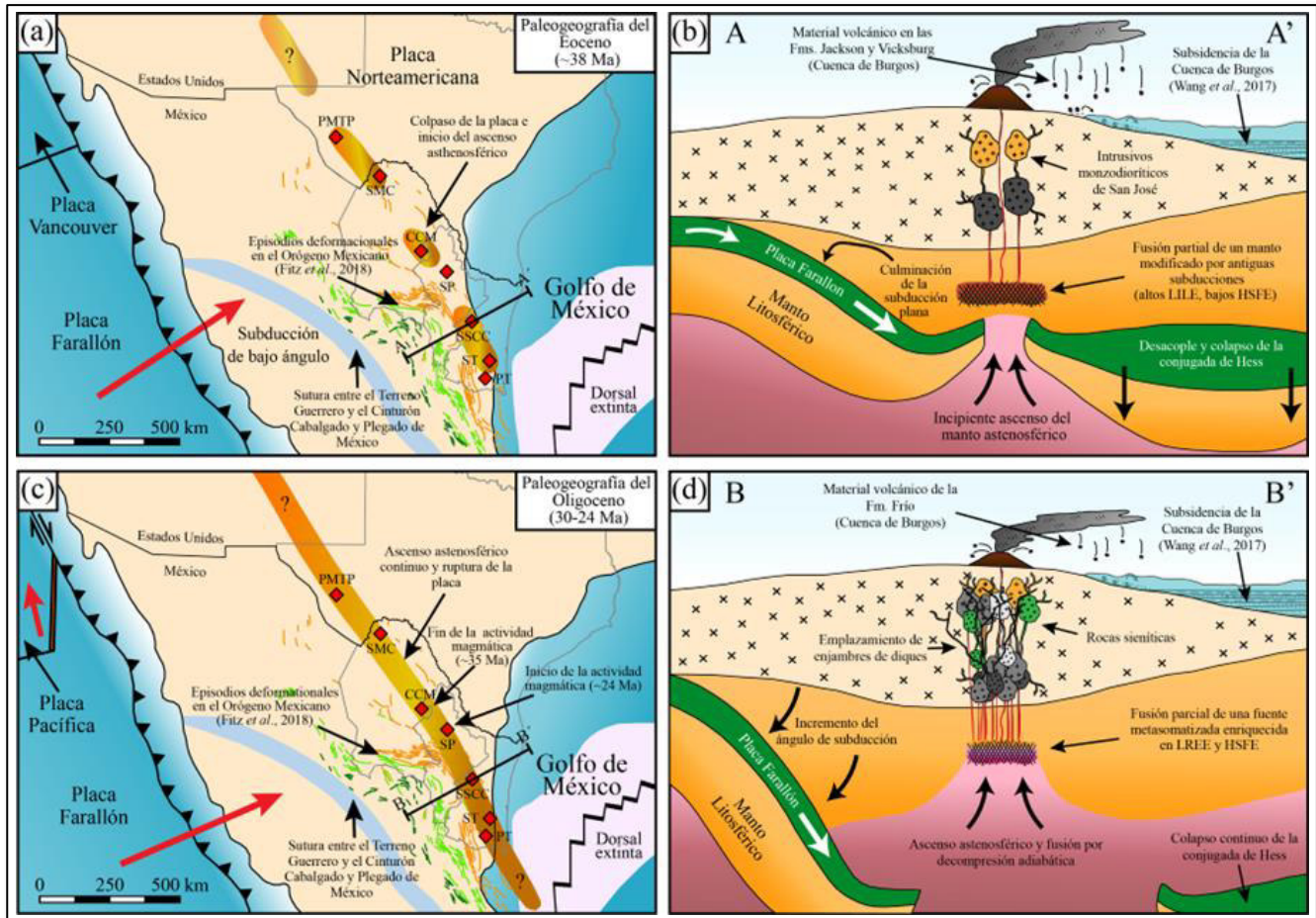


Figura 8: Modelo esquemático para la generación del magmatismo con diferentes firmas geoquímicas, por Elizondo-Pacheco et al. (2022) (a) Procesos del Eoceno, con la ruptura y desencople de la conjugada de Hess, y la fusión parcial de un sector del manto modificado previamente por antiguas subducciones. (b) Procesos en el Oligoceno, con el ascenso astenosféricos y fusión de una fuente metasomatizada. PMTP: Provincia Magmática de Trans-Pecos, SMC: Sierra Maderas del Carmen, CCM: Cinturón Candela-Monclova, SP: Sierra de Picachos, SSCC: Sierra de San Carlos-Cruillas, ST: Sierra de Tamaulipas, PT: Planicie de Tampico.

Recientemente, Elizondo-Pacheco et al. (2022) y Leal-Cuellar et al. (2023) (Figura 8) conjugaron un modelo geotectónico que permite explicar la coexistencia de rocas alcalinas tipo arco y tipo intraplaca continental (OIB: *ocean island basalt*) en la Sierra de San Carlos-Cruillas. Este modelo parte de la hipótesis de que el pasaje y el hundimiento progresivo de una meseta oceánica, denominada de Hess, por debajo del noreste de México durante el Cenozoico (p. ej. Liu et al., 2010; Wang et al., 2017) derivó en la completa eclogitización (es decir, tras un proceso metamórfico de alta presión) de este segmento engrosado de la placa oceánica subducida aumentando así su densidad, desencadenando una fragmentación inicial y su

subsecuente desprendimiento del resto de la Placa Farallón subducida bajo Norteamérica. Durante esta etapa inicial, se tuvo un ascenso astenosférico a lo largo de la zona de rompimiento perturbando así el estado termal de esta región del manto. El proceso de fusión parcial del manto involucró dos fuentes metasomatizadas, primero a una fuente litosférica previamente modificada por procesos de subducción antiguos que dio origen a los magmas con características tipo arco de la SSCC, seguido por una fuente astenosférica enriquecida en LREE y HFSE ligeramente afectada por un metasomatismo carbonatítico que dio origen al resto de las rocas con características geoquímicas intraplaca (tipo OIB).

Conclusiones

La Sierra de San Carlos-Cruillas representa una de las localidades más importantes de nuestro país, ya que expone de manera impresionante interesantes cuerpos magmáticos de composiciones alcalinas con diferentes firmas geoquímicas, además de las rocas sedimentarias encajonantes e importantes eventos de mineralización. A pesar de que existe una importante cantidad de publicaciones científicas, aún quedan temas por resolver.

Bibliografía

- Alemán-Gallardo, E., Ramírez Fernández, J.A., Rodríguez Díaz, A., Velasco-Tapia, F., Jenchen, U., Cruz-Gámez, E., Navarro-de León, I. & de Leon-Barragán, L. (2019a): Evidence for an Ordovician continental arc in the pre-Mesozoic basement of the Huizachal-Peregrina Anticlinorium, Sierra Madre Oriental, Mexico: the Peregrina Tonalite. – *Mineralogy and Petrology*, **113**(4): 433-562. <https://doi.org/10.1007/s00710-019-00660-4>
- Alemán-Gallardo, E.A., Ramírez-Fernández, J.A., Weber, B., Velasco-Tapia, F. & Juan Moisés Casas-Peña, J.M. (2019b): Novillo Metamorphic Complex, Huizachal-Peregrina Anticlinorium, Tamaulipas, Mexico: Characterization and development based on whole-rock geochemistry and Nd-isotopic ratios. – *Journal of South American Earth Sciences*, **96**(102382): 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102382>
- Barboza-Gudiño, J.R., Ramírez-Fernández, J.A., Torres-Sánchez, S.A. & Valencia, V.A. (2011): Geocronología de circones detríticos de diferentes localidades del Esquisto Granjeno en el noreste de México. – *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, **63**(2): 201-216.
- Barker, D.S. (1987): Tertiary alkaline magmatism in Trans-Pecos Texas. – *Geological Society of London, Special Publication*, **30**: 415-431.
- Bloomfield, K. & Cepeda-Davila, L. (1973): Oligocene alkaline igneous activity in NE Mexico. – *Geological Magazine*, **110**: 551-555.
- Camacho-Angulo, F. (1993): Compilación geológica de la vertiente del Golfo de México. Área I. – Comisión Federal de Electricidad, Superintendencia de estudios Zona Golfo, **G**, **43**:123-130.
- Casas-Peña, J.M., Ramírez-Fernández, J.A., Velasco-Tapia, F., Alemán-Gallardo, E.A., Augustsson, C., Weber, B., Frei, D. & Jenchen, U. (2021): Provenance and tectonic setting of the Paleozoic Tamatán Group, NE Mexico: Implications for the closure of the Rheic Ocean. – *Gondwana Research*, **91**(3): 205-230. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2020.12.012>
- Chávez-Cabello, G. (2005): Deformación y magmatismo Cenozoico en el sur de la Cuenca de Sabinas, Coahuila, México. – Tesis de Doctorado, Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México: 313 p.; Juriquilla, Querétaro.
- Clark, K.F., Foster, C.T. & Damon, P.E. (1982): Cenozoic mineral deposits and subduction-related magmatic arcs in Mexico. – *GSA Bulletin*, **93**: 533-544.
- Coombs, H.E., Kerr, A.C., Pindell, J., Buchs, D., Weber, B. & Solari, L. (2020): Petrogenesis of the crystalline basement along the western Gulf of Mexico: Postcollisional magmatism during the formation of Pangea. – in: Martens, U. & Molina-Garza, R.S. (eds.): *Southern and Central Mexico: Basement Framework, Tectonic Evolution, and Provenance of Mesozoic–Cenozoic Basins*. – *GSA Special Paper*, **546**:1-24. [https://doi.org/10.1130/2020.2546\(02\)](https://doi.org/10.1130/2020.2546(02))
- Daugherty, F.W. (1963): La Cueva intrusive complex and dome, northern Coahuila, Mexico. – *GSA Bulletin*, **74**, 1429-1438.
- de la Fuente-García, J. (1976): Exploración geológica-geoquímica de la Sierra de San Carlos-Cruillas, Estado de Tamaulipas. – IPN, Tesis Profesional: 64 p.
- Demant, A. & Robin, C. (1975): Las fases del vulcanismo en México: una síntesis en relación con la evolución geodinámica desde el Cretácico. – *Revista del Instituto de Geología UNAM*, **1**: 70-83.
- Eguiluz de Antuñano, S. (2001): Geologic evolution and gas resources of the Sabinas Basin in northeastern Mexico. – in: Bartolini, C., Buffler, R.T. & Cantú-Chapa, A. (eds.): *The western Gulf of Mexico Basin: Tectonics, sedimentary basins, and petroleum systems*. – *AAPG Memoir*, **75**: 241-270. <https://doi.org/10.1306/M75768C10>
- Eguiluz de Antuñano, S. (2011a): Estratigrafía, análisis de secuencias y control estructural en la Formación Yegua, Cuenca de Burgos, noreste de México. – *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, **63**(2): 171-181.
- Elizondo-Pacheco, L.A. (2017): Magmatismo hipabisal periférico de la Sierra de San Carlos, Tamaulipas. – Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL: 79 p.; Linares, N.L.
- Elizondo-Pacheco, L.A. & Ramírez-Fernández, J.A. (2017): Petrología del magmatismo hipabisal periférico de la Sierra de San Carlos. – *Ciencia UANL*, **20**: 27-36.
- Elizondo-Pacheco, L.A. (2019): Análisis petrológico de las rocas subvolcánicas de la sierra de San Carlos, Tamaulipas. – Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL: 183 p.; Linares, N.L.
- Elizondo-Pacheco, L.A., Ramírez-Fernández, J.A., De Ignacio, C., González-Guzmán, R., Rodríguez-Saavedra, P., Leal-Cuellar, V.A., Velasco-Tapia, F. & Montalvo-Arrieta, J.C.

- (2022): Generation of Arc-Like and OIB-Like Magmas Triggered by Slab Detachment in the Eastern Mexican Alkaline Province: Petrological Evidence from the Cenozoic Sierra de San Carlos-Cruillas Complex, Tamaulipas. – *Journal of Petrology*, **63(egac027)**: 1–24. <https://doi.org/10.1093/petrology/egac027>
- Fastovsky, D.E., Hermes, O.D., Strater, N.H., Bowring, S.A., Clark, J.M., Montellano, M. & Hernandez R., R. (2005): Pre-Late Jurassic, fossil-bearing volcanic and sedimentary red beds of Huizachal Canyon, Tamaulipas, Mexico. – in: Anderson, T.H., Nourse, J.A., McKee, J.W. & Steiner, M.B. (eds.): *The Mojave-Sonora megashear hypothesis: Development, assessment, and alternatives*. – GSA Special Paper, **393**: 401-426. [https://doi.org/10.1130/2005.2393\(15\)](https://doi.org/10.1130/2005.2393(15))
- Ferrari, L., Tagami, T., Eguchi, M., Orozco-Esquivel, M.T., Petrone, C.M., Jacobo-Albarrán, J. & López-Martínez, M. (2005): Geology, geochronology and tectonic setting of late Cenozoic volcanism along the Southwestern Gulf of Mexico: The Eastern Alkaline Province Revised. – *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **146**: 284-306.
- Fitz-Díaz, E., Lawton, T.F., Juárez-Arriaga, E. & Chávez-Cabello, G. (2018): The Cretaceous-Paleogene Mexican orogen: Structure, basin development, magmatism and tectonics. – *Earth-Science Reviews* **183**: 56-84. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.03.002>
- Gómez-Tuena, A., Lagatta, A.B., Langmuir, C.H., Goldstein, S.L., Ortega-Gutiérrez, F. & Carrasco-Núñez, G. (2003): Temporal Control of Subduction Magmatism in the Eastern Trans-Mexican Volcanic Belt: Mantle Sources, Slab Contributions and Crustal Contamination. – *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **4(8)**: 8912 (1-33). <https://doi.org/10.1029/2003GC000524>
- Iriondo, E., Kunk, M.J., Winick, J.A. & Consejo De Recursos Mienrales (2003): *40Ar/39Ar dating Studies of Minerals and Rocks in various areas in Mexico: USGS/CRM Scientific Collaboration (Part I)*. – United States Geological Survey, Open-File Report, **03-020**.
- James, E. & Henry, C. (1991): Compositional changes in Trans-Pecos Texas magmatism coincident with Cenozoic stress realignment. – *Journal of Geophysical Research*, **96**: 561-575.
- Keppie, J.D. (2004): Terranes of Mexico revisited; a 1.3 billion year odyssey. – *International Geology Review*, **46(9)**: 765-794. <https://doi.org/10.2747/0020-6814.46.9.765>
- Leal-Cuellar, V.A. (2018): *Petrografía y Estructuras Sinmagmáticas de las Rocas Gabróicas en la Sierra de San Carlos, Tamaulipas*. - Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias de la Tierra: 90 p.; Linares, N.L.
- Leal-Cuellar, V.A. (2020): *Caracterización Petroológica del Complejo Gabróico Rincón Murillo de la Sierra de San Carlos, Tamaulipas*. – Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias de la Tierra: 156 p.; Linares, N.L.
- Leal-Cuellar V.A., Ramírez-Fernández, J.A., González-Guzmán, R., Velasco-Tapia, F., Solari, L., Elizondo-Pacheco, L.A., Montalvo-Arrieta, J.C., Rivera-García, J.J., Weber, B. (2023): Metasomatized mantle under the Eastern Mexican Alkaline Province: evidence from the Oligocene Rincón Murillo Gabbro, Sierra de San Carlos-Cruillas, NE México. – *International Geology Review*: 1-28. <https://doi.org/10.1080/00206814.2023.2209895>
- López-Ramos E. (1979): *Geología de México, Tomo II*. – Instituto de Geología de la UNAM: 454 p.
- Liu, L., Gurnis, M., Seton, M., Saleeby, J., Müller, R.D. & Jackson, J.M. (2010): The role of oceanic plateau subduction in the Laramide orogeny. – *Nature Geoscience*, **3(5)**: 353-357.
- Márquez-Domínguez, B.B. (1970): *Geología de la Sierra de San Carlos-Cruillas*. Tesis Profesional, UNAM, 83 p.
- Mendoza Vargas, A. (2010): *Relaciones entre el magmatismo terciario y la mineralización en el área de San José, sierra de San Carlos - Cruillas, Tamaulipas, México*. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL, 126 p.; Linares, N.L.
- Murray, K. D., Murray, M. H. & Sheehan, A. F. (2019): Active deformation near the Rio Grande Rift and Colorado Plateau as inferred from continuous Global Positioning System measurements. – *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **124(2)**: 2166-2183.
- Nelson, S.A. & González-Caver, E. (1992): Geology and K-Ar dating of the Tuxtla Volcanic Field, Veracruz, Mexico. – *Bulletin of Volcanology*, **55**: 85-96.
- Nick, K. (1988): *Mineralogische, geochemische und petrographische Untersuchungen in der Sierra de San Carlos (Mexiko)*. – Tesis Doctoral, Universidad de Karlsruhe: 167 p.
- Ortega-Obregón, C., Solari, L., Gómez-Tuena, A., Elías-Herrera, M., Ortega-Gutiérrez, F. & Macías-Romo, C. (2014): Permian–Carboniferous arc magmatism in southern Mexico: U–Pb dating, trace element and Hf isotopic evidence on zircons of earliest subduction beneath the western margin of Gondwana. – *International Journal of Earth Sciences (Geologische Rundschau)*, **103(5)**: 1287-1300. <https://doi.org/10.1007/s00531-013-0933-1>
- Pérez-Cruz, G.A. (1992): *Geologic evolution of the Burgos Basin, Northeastern Mexico*. – PhD Thesis, Rice University: 209 p.; Houston, TX.

- Poliquin, M.J. (2009): Geology, Geochemistry and age of intrusion-related mineralisation in eastern Mexico. – Tesis Doctoral, Universidad de Exter: 408 p.
- Ramírez-Fernández, J.A. (1989): Geologische Neukartierung und petrographische Untersuchung der Kontaktmetamorphose des Bufa del Diente-Instrusivus, Sierra de San Carlos (Tamaulipas, NOrdost Mexiko). – Diplomarbeit, Universität Hamburg: 132 p.; Hamburg.
- Ramírez-Fernández, J.A. (1992): Sobre la Geología de la Sierra de San Carlos, Tamaulipas. Encuentro Hispano Mexicano sobre Geología y Minería. – MEMORIAS, **4**: 201-206.
- Ramírez-Fernández, J.A. (1996): Zur Petrogenese des Alkalikomplex der Sierra de Tamaulipas, NE-Mexiko. Tesis Doctoral, Facultad de Geociencias, Universidad de Freiburg: 317 p.; Freiburg.
- Ramírez-Fernández, J.A., Keller, J. & Hubberten, H.W. (2000): Relaciones genéticas entre las carbonatitas y las rocas nefelínicas del complejo El Picacho, Sierra de Tamaulipas, NE de México. – Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, **17**: 45-65.
- Ramírez-Fernández, J.A., Alemán-Gallardo, E.A., Cruz-Castillo, D., Velasco-Tapia, F., Jenchen, U., Becchio, R.B., De León-Barragán, L. & Casas-Peña, J.M. (2021): Early Mississippian precollisional, peri-Gondwanan volcanic arc in NE-Mexico: Aserradero Rhyolite from Ciudad Victoria, Tamaulipas. – International Journal of Earth Sciences, **10.1007/s00531-021-01992-3**: 1-29. <https://doi.org/10.1007/s00531-021-01992-3>
- Robin, C. (1976): El vulcanismo de las planicies de la Huasteca (Este de México). Datos geoquímicos y petrográficos. – Boletín del Instituto de Geología UNAM, **96**: 55-92.
- Robin, C. (1982): Relations volcanologie-magmatologie-geodynamique: application au passage entre volcanismes alcalin et andésitique dans le sud Mexicain (Axe Transmexicain et Province Alcaline Oriental). – Tesis doctoral, Annales Scientifiques de l'Université de Clermont-Ferrand II.
- Robin, C. & Tournon, J. (1978): Spatial relations of andesitic and alkaline provinces in Mexico and Central America. – Canadian Journal of Earth Sciences, **15**: 1633-1641.
- Rodríguez-Saavedra, P. (2003): Petrografía y Geoquímica de las Rocas Magmáticas de la Sierra de San Carlos. – Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL: 134 p.; Linares, N.L.
- SGM (Servicio Geológico Mexicano) (2004): Carta Geológico-Minera Linares G14-11, escala 1:250,000. – Hoja y reporte: 102 p.
- Thorpe, R.S. (1977): Tectonic significance of alkaline volcanism in eastern Mexico. – Tectonophysics, **40**: 19-26.
- Treviño-Cázares, A., Ramírez-Fernández, J.A., Velasco-Tapia, F. & Rodríguez-Saavedra, P. (2005): Mantle Xenoliths and Their Host Magmas in the Eastern Alkaline Province, Northeast Mexico. – International Geology Review. **47**: 1260-1286.
- Urrutia-Fucugauchi, J. (1986): Crustal thickness, heat flow, arc magmatism, and tectonics of Mexico-preliminary report. – Geofísica internacional, **25(4)**: 559-573.
- Verma, S.P. (2006): Extension-related origin of magmas from a garnet-bearing source in the Los Tuxtlas volcanic field, Mexico. – International Journal of Earth Sciences, **95**: 871.
- Viera-Décida, F., Ramírez-Fernández, J.A., Velasco-Tapia, F. & Orozco-Esquivel, M.T. (2009): Relaciones Petrogenéticas del Magmatismo en la Provincia Alcalina Oriental Mexicana. – Ciencia UANL, **XII**: 42-49.
- Wang, H., Gurnis, M. & Skogseid, J. (2017): Rapid Cenozoic subsidence in the Gulf of Mexico resulting from Hess rise conjugate subduction. – Geophysical Research Letters, **44**: 10930-10938.