

[PE07]

**FORMACIÓN SAN FELIPE:
LA HUELLA DE VULCANISMO CRETÁCICO EN LA SIERRA MADRE ORIENTAL**

**Fernando Velasco-Tapia¹, Margarita Martínez-Paco¹, Alexander Iriondo², Andrés Ramos-Ledezma¹,
Yam Zul Ernesto Ocampo-Díaz³, Esther María Cruz-Gamez¹, Pedro Rodríguez-Saavedra¹,
Augusto Antonio Rodríguez-Díaz⁴ y Jorge Alberto Andaverde Arredondo⁵**

¹*Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias de la Tierra, Ex – Hacienda de Guadalupe,
Carretera Linares-Cerro Prieto km. 8, 67700 Linares, N.L.*

E-mail: fernando.velascot@uanl.edu.mx

²*Centro de Geociencias, UNAM, Blvd. Juriquilla 3001, 76230 Querétaro, Qro.*

³*Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Dr. Manuel Nava 8, 78290 San Luis Potosí, S.L.P.*

⁴*Instituto de Geofísica, UNAM, Circuito de la Investigación Científica, Cd. Universitaria, 04150 México, D.F.*

⁵*Centro de Investigación en Recursos Energéticos y Sustentables, Universidad Veracruzana, Coatzacoalcos, Ver.*

INTRODUCCIÓN

La Sierra Madre Oriental (SMO) es una cadena montañosa de rocas sedimentarias, con una longitud de ~800 km, un ancho de ~80 km, y elevaciones que alcanzan altitudes de ~3,500 msnm, la cual se ubica en las regiones noreste y central de México (Goldhammer, 1999; Eguiluz de Antuñano *et al.*, 2000). El registro litológico de la SMO incluye unidades que cubren desde el Jurásico Medio al Cretácico Superior, las cuales fueron depositadas sobre un basamento cristalino (Figura 1; Michalzik, 1996). Los estratos fueron plegados y cabalgados durante el evento orogénico Laramide, entre el Cretácico Superior y el Paleoceno (Eguiluz de Antuñano *et al.*, 2000).

En la estratigrafía de la SMO, la Formación San Felipe representa el proceso de sedimentación durante el Coniaciano – Santoniano. Su descripción inicial se efectuó en un afloramiento situado en el ejido San Felipe, ubicado a 8 km al Este de Ciudad Valles, S.L.P. (Muir, 1936) Posteriormente, Seibertz (1988) redefinió la unidad en la localidad neotipo Santiago, N.L., al lado Este de la Presa Rodrigo Gómez. De acuerdo a estos trabajos, la Formación San Felipe representa una transición paulatina de caliza masiva a estratos de terrígenos (lutita o marga), que en conjunto conforman un espesor total de ~130 m y que fueron depositadas en un ambiente de base de talud y cuenca somera. De acuerdo a reconstrucciones paleogeográficas, la unidad se encuentra ampliamente distribuida en Nuevo León, Tamaulipas y San Luis Potosí. Generalmente, los afloramientos se presentan en el frente de la SMO, aunque algunos ocurren en su zona de transpaís. Se ha utilizado, desde hace 80 años, como un control estratigráfico durante la perforación de pozos petroleros (Muir, 1936).

Por otra parte, en todos los reportes acerca de la Formación San Felipe se ha reportado la presencia de una serie de capas gris claro a verde (Figura 2), intercaladas con la caliza y la lutita, cuyo espesor (máximo ~30 cm) y número por afloramiento (10-30) disminuye conforme se asciende estratigráficamente. Muir (1936) la interpretó como “bentonita” (ceniza volcánica alterada a arcillas; Christidis y Huff, 2009), mientras que Seibertz (1988) la consideró una arenisca de grano medio gradando a limolita, cuya coloración verde la asoció a la presencia de glauconita. Este un mineral monoclinico del grupo de las arcillas cuyo origen se encuentra asociado a una sedimentación que ocurre en microambientes de reducción dentro de una plataforma somera y con baja acumulación de detritos (Moore y Reynolds, 1997).

El propósito de esta investigación ha sido el establecer la naturaleza de los estratos verdes de la Formación San Felipe, su procedencia, afinidad tectónica y edad. Sin embargo, el objetivo principal ha sido el determinar qué implicaciones tiene en la evolución geológica del Noreste de México la presencia de estas rocas dentro de la columna estratigráfica de la SMO.

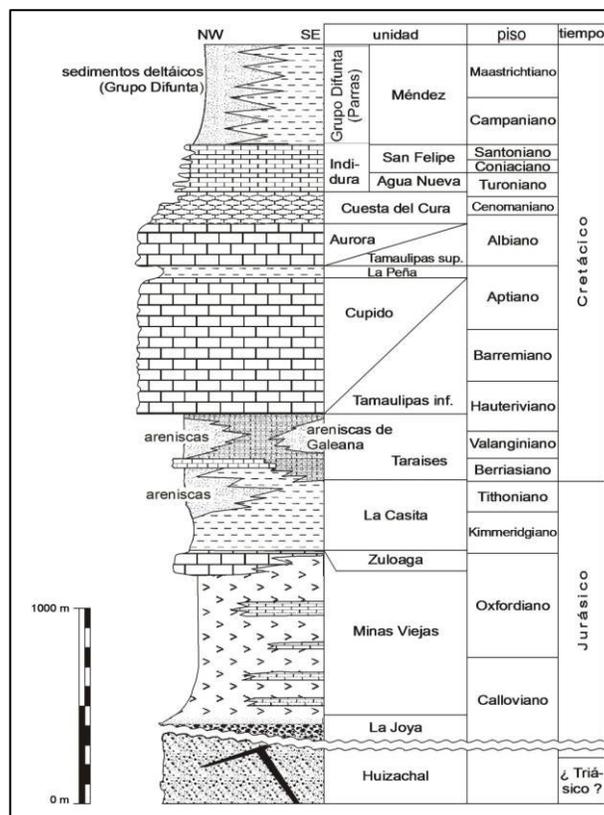


Figura 1. Columna estratigráfica general para la Sierra Madre Oriental, NE de México (Michalzik, 1996)

METODOLOGÍA

A fin de alcanzar los objetivos propuestos se estableció un plan de trabajo que incluyó: (a) *Trabajo de campo*: localización, levantamiento y muestreo de perfiles estratigráficos de la Formación San Felipe; (b) *Análisis mineralógico*: Reconocimiento de texturas e identificación de minerales en lámina delgada. Aplicación de Difracción de Rayos-X para identificación de minerales, especialmente los de tipo arcilloso; (c) *Análisis geoquímico de roca total*: Determinación de elementos mayores (XRF) y traza (ICP-MS) en muestras seleccionadas; y (d) *Geocronología*: Datación radiométrica U-Pb en circones detríticos.

RESULTADOS

La investigación se ha efectuado, sobre todo, a través del desarrollo de cuatro tesis de licenciatura (Becerra-González, 2006; González Alejandro y Martínez Limas, 2009; Navarro-Gutiérrez, 2010; Serna-Pedraza, 2011) y una de maestría (Martínez-Paco, 2012). La información generada fue capturada en una base de datos con formato *STATISTICA for WINDOWS 5.0*. Los resultados más relevantes del análisis de esta base se presentan en los siguientes apartados.

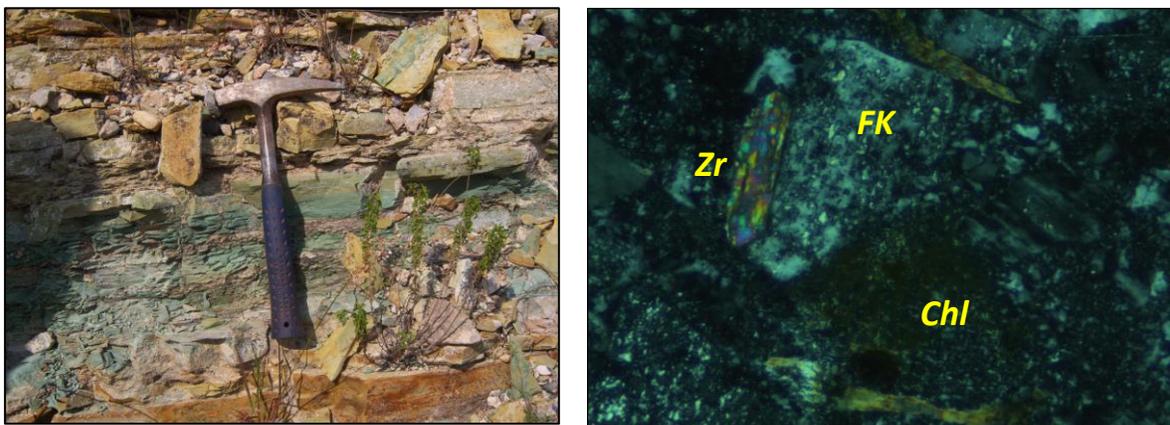


Figura 2. Estratos de toba alterada de la Formación San Felipe (Localidad: Juan Capitán, Rumbo Nuevo, Tamaulipas). **Figura 3.** Microfotografía de una toba alterada de la Formación San Felipe (Localidad Cerro Labradores). Imagen tomada con nicoles cruzados; longitud horizontal = 0.5 mm. Cristales de FK = feldespato potásico, Zr = circón y Chl = clorita embebidos en una matriz fina vítreo arcillosa.

Trabajo de campo

Se han estudiado ocho localidades, distribuidas en Nuevo León (Cerro Prieto, CP; Rancho Viejo, RV; La Fábrica, LF; Puerto Pastores, PP; Cerro Labradores, CL; Pedro Carrizales, PC; y Huasteca, HU) y Tamaulipas (Juan Capitán, JC). En comparación al estrato-tipo propuesto por Seibertz (1988), todas las secciones estudiadas se encuentran expuestas parcialmente, aunque sin mostrar complicaciones estructurales y con un contacto definido con la Formación Agua Nueva o Méndez.

Cada sección contiene entre 8 y 30 horizontes verdes, los cuales se alteran a ocre, y que muestran contactos bien definidos con el resto de las litologías. Su espesor (3-40 cm) y número disminuyen en dirección al contacto con la Formación Méndez. En algunos de estos estratos se ha observado la presencia de ichnofauna relacionada a *Cruziana* y *Zoophycos*. Por otra parte, existen algunos estratos en donde el material que compone los horizontes verdes se encuentra mezclado con carbonatos. Esta litología fue nombrada como “porcelanita” por Seibertz (1988). A fin de efectuar el estudio mineralógico, geoquímico y geocronológico, se colectaron 90 muestras.

Análisis mineralógico

En general, los horizontes verdes de San Felipe muestran una textura porfírica, que incluye cuarzo (18-35%), plagioclasa sódica alterada (7-26%), y feldespato potásico alterado (5-25%), así como fragmentos líticos (Figura 3). La mineralogía la complementan microcristales de circón, biotita y minerales opacos. Los especímenes ocurren diseminados en una matriz vítreo-arcillosa, que muestra una devitrificación variable y cementados por carbonatos.

De acuerdo a su contenido en cristales, líticos y vidrio (Pettijohn *et al.*, 1987), las rocas verdes de la Formación San Felipe pueden considerarse como tobas vítreas de composición riodacítica a riolítica. Adicionalmente, la composición química de los cristales de circón indican un indudable origen volcánico. En este punto, es importante señalar que los experimentos con difracción de rayos-X revelaron la presencia de illita, illita-esmectita y clorita, pero no la algún tipo de glauconita.

Análisis geoquímico de roca total

Las rocas se caracterizan por una composición variable en SiO₂ (45-80%, n = 75), acompañado de Al₂O₃ (9-27%), CaO (0.6-19%), K₂O (0.07-9%) y CO₂ (0.06-15%). De igual forma, las rocas muestran intervalos composicionales amplios en el caso de los elementos traza litófilos (e.g., Ba: 2.1-4017 ppm), de campo electrostático fuerte (e.g., Hf: 2.2-18 ppm) y lantánidos (e.g., La: 4.1-53 ppm).

Los diagramas normalizados a basaltos de cresta oceánica (MORB, *mid-ocean ridge basalts*) (Figura 4a) indican un enriquecimiento en elementos litófilos (Sr, K, Rb y Ba) y anomalías marcadas en elementos de campo electrostático fuerte (Nb, Zr y Ti). La forma de estos diagramas es aquella observada en rocas volcánicas félsicas generadas en un ambiente de arco continental (Rollinson, 1993).

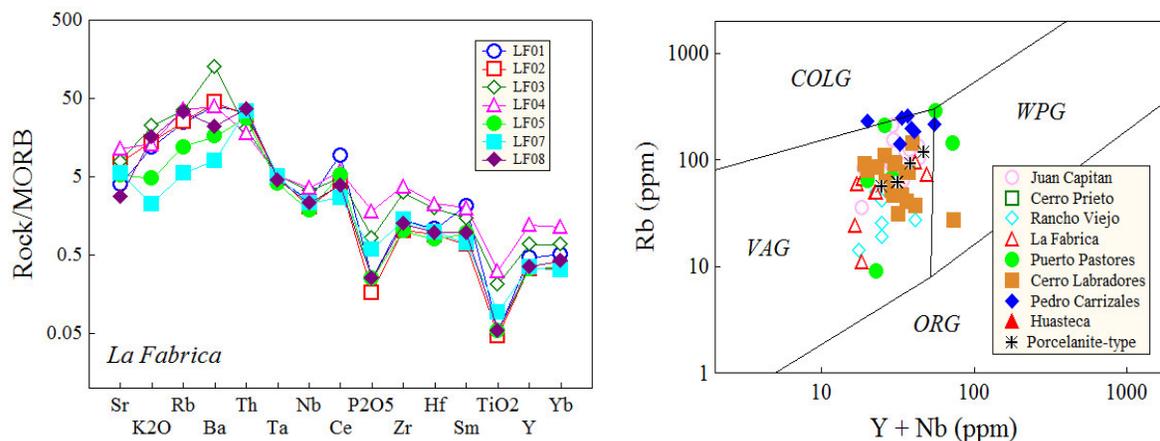


Figura 4. (a) Ejemplo de diagrama multi-elementos, normalizado a MORB, para la toba alterada de la Formación San Felipe (Localidad: La Fábrica). Datos de normalización tomados de Rollinson¹⁴. (b) Ejemplo de aplicación de un diagrama de discriminación tectono-magmática (Pearce et al.¹⁵). COLG = ambiente de colisión; VAG = ambiente de arco volcánico; WPG = ambiente intraplaca; ORG = ambiente orogénico.

Como soporte a lo que indican los datos mineralógicos, la geoquímica de elementos inmóviles y la aplicación de diagramas de discriminación tectónica confirman la naturaleza volcánica de los estratos, su composición ácida y una afinidad a un arco continental (Figura 4b; Pearce *et al.*, 1984).

Geocronología

La edad de depósito de las tobas se estableció aplicando el método radiométrico U-Pb en circones. Por tal motivo, se seleccionaron muestras de toba alterada provenientes de la base y el techo de cada perfil litológico de la Formación San Felipe. Las muestras fueron trituradas y un grupo de circones (20-40) fueron separados aplicando técnicas magnéticas y de contraste de densidad. El análisis isotópico de U y Pb fue llevado a cabo utilizando un sistema LA-ICP-MS Thermo Xii. Un resumen del método y el tratamiento de datos puede consultarse en Solari *et al.* (2010).

En general, la aplicación del método U-Pb ha revelado que el depósito ocurrió entre 84 y 74 Ma (Santoniano-Campaniano; Figura 5). Una relación Zr/Sc ajustada a la observada en la Corteza Continental Superior (~20) o a máximo tres veces este valor, es indicador de un depósito que ocurrió en un tiempo relativamente corto desde la emisión.

CONCLUSIONES

Los resultados generados durante el presente estudio indican que los estratos verdes pueden considerarse como tobas alteradas. Estos materiales incluyen cristales de cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa sódica, circón, biotita y minerales opacos diseminados en una matriz vítreo-arcillosa, que incluye illita, montmorillonita y clorita.

Diversas líneas de evidencia indican que la fuente fue una ceniza de composición intermedia a ácida, generada desde volcanes asociados a un ambiente de arco continental. El depósito de estas cenizas ocurrió entre el Santoniano y el Campaniano en un ambiente de talud o de cuenca somera.

La información generada en este trabajo tiene además una importancia más allá de lo regional. Durante el Cretácico Superior (100 a 65 millones de años), se desarrolló la denominada Cordillera Occidental de Norteamérica (DeCelles, 2004) como resultado de la subducción de la placa Farallón a lo largo del margen

continental (Figura 6).

Por otra parte, las condiciones climáticas de efecto invernadero que prevalecían en el Cretácico Superior dieron lugar al establecimiento del denominado Mar Interior Occidental (MIO) de Norteamérica (Miall *et al.*, 2008), que unía el mar Ártico con el proto-Golfo de México (Figura 6). Este mar somero y alargado tuvo las condiciones adecuadas para la precipitación de carbonatos, además de recibir detritos de la erosión de las elevaciones continentales. La estratigrafía sedimentaria se complementó al recibir aportes de ceniza emitida por los aparatos volcánicos en actividad.

La región Noreste de México podría considerarse como la parte más austral del MIO en donde quedó registro de la actividad volcánica del Cretácico Superior en el occidente de Norteamérica.

AGRADECIMIENTOS

La investigación fue efectuada con apoyo del programa PAICYT-UANL (CT293-10) y a través de un proyecto CONACyT (Clave: 0106939). Se agradece el apoyo de Instituto de Geología y del Centro de Geociencias, UNAM, así como del Centro de Microscopía, Universidad Complutense para efectuar la parte analítica del proyecto.

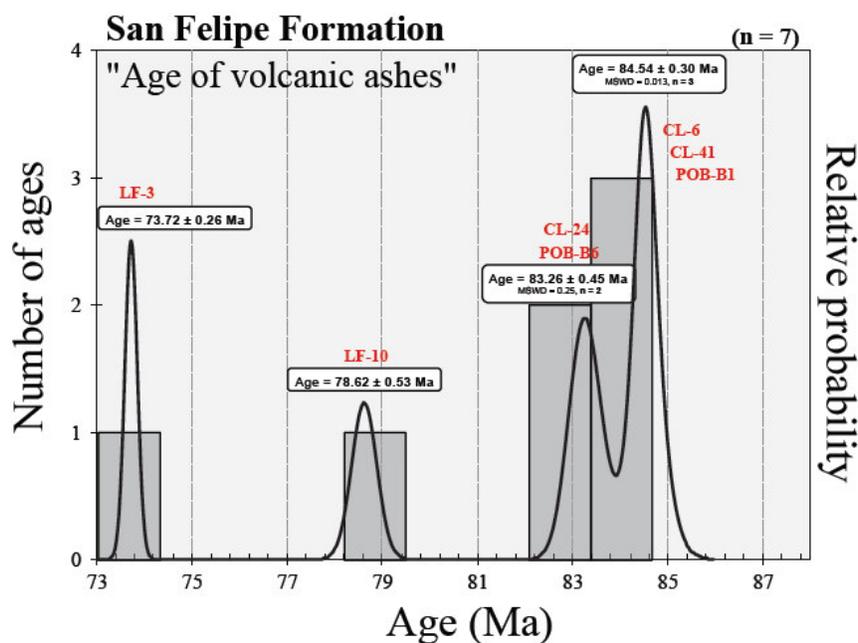


Figura 5. Resumen de la geocronología U-Pb en circon para la toba alterada de la Formación San Felipe (localidades LF = La Fábrica; CL = Cerro Labradores; POB = Pedro Carrizales).

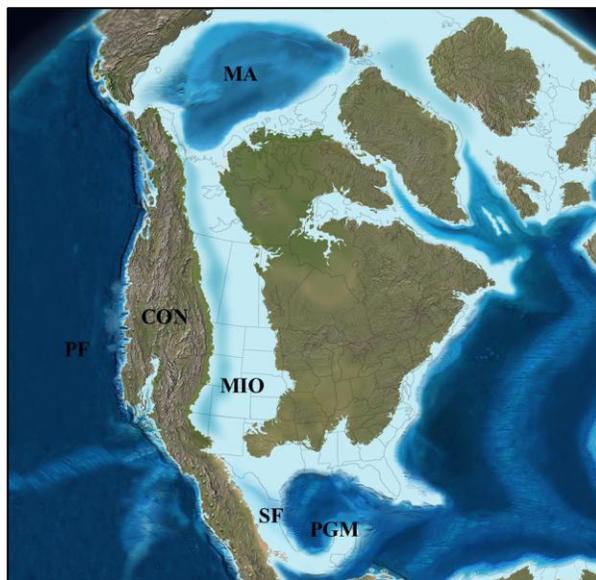


Figura 6. Reconstrucción paleogeográfica de Norteamérica para el Cretácico Superior (85 Ma; Blackey, 2015). Abreviaturas: PF = Placa Farallón, CON = Cordillera Occidental de Norteamérica, MIO = Mar Interior Occidental, MA = Mar Ártico, PGM = Proto-Golfo de México, SF = Región Noreste de México donde se distribuye la Formación San Felipe.

REFERENCIAS

- Becerra González, C. 2006. Estudio geoquímico y mineralógico de los sedimentos clásticos de la Formación San Felipe, NE de México. Tesis de Licenciatura (Ing. Geólogo), Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL, Linares, N.L., 126 p.
- Blakey, R. 2015. Late Cretaceous paleogeographic map. Colorado Plateau Geosystems, Inc., Acceso: <http://jan.ucc.nau.edu/rcb7/namK85.jpg>
- Christidis, G.E., Huff, W.D. 2009. Geologic aspects and genesis of bentonites. *Elements* 5, 93-98.
- DeCelles, P.G. 2004. Late Jurassic to Eocene evolution of the Cordilleran thrust belt and foreland basin system, western U.S. *American Journal of Science* 304, 105-168.
- Eguiluz De Antuñano, S., Aranda, G.M., Marrett, R. 2000. Tectónica de la Sierra Madre Oriental, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 53, 1-26.
- Goldhammer, R.K. 1999. Mesozoic sequence stratigraphy and paleogeographic evolution of north east México: Mesozoic sedimentary and tectonic history of north – central México. *Geological Society of America Special Paper* 340, 1-58.
- González Alejandro, A.G., Martínez Limas, N.A. 2009. Formación San Felipe: Caracterización mineralógica y geoquímica de rocas clásticas en el N de la Sierra Madre Oriental, NE de México. Tesis de Licenciatura (Ing. Geólogo), Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL, Linares, N.L., 149 p.
- Martínez Paco, M. 2012. Análisis petrográfico, geoquímico y geocronológico U-Pb de cenizas volcánicas alteradas de la Formación San Felipe (Cretácico Superior) en Cerro de Labradores, Galeana, N.L., Sierra Madre Oriental. Tesis de Maestría en Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL, Linares, N.L., 96 p.
- Miall, A.D., Catuneanu, O., Vakarelov, B.K., Post, R. 2008. Chapter 9: The Western Interior Basin. En: Miall, A.D. (Ed.), *Sedimentary Basins of the World*, p. 329-362.
- Michalzik, D. 1996. Stratigraphy and paleogeographic of the Northeast Sierra Madre Oriental, Mexico (Triassic – Lowermost Cretaceous). *Zentralblatt Geologische und Paläontologie* 9/10, 11-19.
- Moore, D.M., Reynolds, R.C. 1997. X-Ray Diffraction and the identification and analysis of clay minerals. Oxford University Press, 371 p.
- Muir, J.M. 1936. Geology of Tampico, Mexico. American Association of Petroleum Geologists Report, 280 p.

- Navarro Gutiérrez, N. R. (2010). Estudio mineralógico y geoquímico de la Formación San Felipe en Iturbide, N.L. Tesis de Licenciatura (Ing. Geólogo Mineralogista), Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL, Linares, N.L., 81 p.
- Pearce, J., Harris, N., Tindle, A. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology* 25, 956-983.
- Pettijohn, F.J., Potter, P.E., Siever, R. 1987. Sand and sandstone. 2da. Edición. Springer, New York, 553 p.
- Rollinson, H.R. 1993. Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation. Longman Scientific & Technical, Essex, 352 p.
- Seibertz, E. 1988. El desarrollo cretácico del Archipiélago de Tamaulipas. I – Litogénesis, paleogeografía y datación bioestratigráfica de la Formación San Felipe por medio de Inoceramidos en el estado de Nuevo León (Turoniano, NE México). *Actas de la Facultad de Ciencias de la Tierra UANL Linares* 3, 9-29.
- Serna Pedraza, A.A. 2011. Estudio mineralógico y geoquímico de tobas alteradas de la Formación San Felipe (Cretácico Superior) en la localidad Juan Capitán, Rumbo Nuevo, Tamaulipas, México. Tesis de Licenciatura (Ing. Geólogo Mineralogista), Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL, Linares, 87 p.
- Solari, L.A., Gómez-Tuena, A., Bernal, J.P., Pérez-Arvizu, O., Tanner, M. 2010. U-Pb zircon geochronology with an integrated LA-ICP-MS Microanalytical Workstation: Achievements in Precision and Accuracy. *Geostandards and Geoanalytical Research* 34, 5-18.