

# GRAFITO EN EL COMPLEJO METAMÓRFICO PALEOZOICO ESQUISTO GRANJENO

Sonia Alejandra Torres-Sánchez<sup>1,\*</sup>, Uwe Jenchen<sup>2</sup>, Carita Augustsson<sup>3</sup>,  
José Rafael Barboza-Gudiño<sup>4</sup>, Karla Rubi Martínez-Hernández<sup>5</sup>, Vivian Ruiz-Mendoza<sup>1</sup>  
& Ramón Torres-Hernández<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, 78290, San Luis Potosí, S.L.P, México

<sup>2</sup> Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León, 67700, Nuevo León, México

<sup>3</sup> Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad de Stavanger, 4021, Stavanger, Noruega

<sup>4</sup> Instituto de Geología, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, 78290, San Luis Potosí, S.L.P, México

<sup>5</sup> Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, 78216, San Luis Potosí, S.L.P, México

\* [sonia.torres@uaslp.mx](mailto:sonia.torres@uaslp.mx)

## Resumen

El Complejo Metamórfico Paleozoico Esquisto Granjeno se compone por rocas con eductos sedimentarios e ígneos. El énfasis de este trabajo radica en la una unidad grafitica, de la cual no se ha entendido completamente su origen y evolución. Durante el metamorfismo las condiciones de grafitización corresponden a un proceso irreversible. Por lo cual el proceso de grafitización se considera un indicador confiable para estimar las condiciones térmicas máximas durante el metamorfismo. Se realizaron análisis geoquímicos en roca total y mineral con la finalidad de estimar las condiciones de grafitización y la mineralogía formada durante este proceso. Se estima que el proceso de grafitización ocurrió en dos rangos de temperatura de 318–339°C y 426–432°C. Por lo tanto, los sedimentos ricos en materia orgánica depositados en una cuenca oceánica localizada en la periferia del NW Gondwana fueron afectados por alto grado de metamorfismo regional durante el cierre de Pangea.

## Palabras clave

Grafito, Espectometría Raman, metamorfismo, Complejo Metamórfico Paleozoico Esquisto Granjeno, Sierra Madre Oriental

## Abstract

The Paleozoic Granjeno Schist Metamorphic Complex is composed of rocks with sedimentary and igneous educts. This work emphasizes the graphitic unit, whose origin and evolution are not fully understood. During metamorphism, graphitization conditions correspond to an irreversible process. Therefore, the graphitization process is a reliable indicator for estimating the maximum thermal conditions during metamorphism. Geochemical analyses were carried out on total rock and minerals in order to estimate the graphitization conditions and the mineralogy formed during this process. It is estimated that the graphitization process occurred in two temperature ranges of 318–339°C and 426–432°C. Therefore, organic-rich sediments deposited in an oceanic basin located at the periphery of NW Gondwana were affected by a high degree of regional metamorphism during the closure of Pangea.

---

Torres-Sánchez, S.A., Jenchen, U., Augustsson, C., Barboza-Gudiño, J.R., Martínez-Hernández, K.R., Ruiz-Mendoza, V. & Torres-Hernández, R. (2023): Grafito en el Complejo Metamórfico Paleozoico Esquisto Granjeno. – 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)**: 195-200.

## Keywords

Graphite, Raman Spectrometry, metamorphism, Paleozoic Granjeno Schist Metamorphic Complex, Sierra Madre Oriental

## Introducción

El planeta Tierra es un sistema dinámico que desde su formación hace 4,500 millones de años hasta la actualidad y a través de diversos procesos geológicos como orogenias, vulcanismo, sedimentación, erosión por mencionar algunos han contribuido a la formación y destrucción de corteza (Dewey et al., 1981). Durante la evolución geológica del planeta, la tectónica de placas ha tenido un rol fundamental en la configuración de sus masas continentales. Un proceso en particular relacionado con el movimiento de las placas tectónicas y a la cual se atribuye la formación de montañas en una región, es conocido como “orogénesis” la cual opera durante millones de años de manera lenta y progresiva (Marín Lechado et al., 2017). Evidencia de este tipo de actividad esta presente en las rocas del noreste de México que conforman el basamento geológico de la Sierra Madre Oriental.

La Sierra Madre Oriental corresponde a una cordillera cuyo relieve se debe a la deformación de rocas de edad mesozoica y de su complejo basal, formando pliegues y cabalgaduras

(Eguíluz de Antuñano et al., 2000; Figura 1). Existen algunas localidades del basamento de la Sierra Madre Oriental que han sido estudiadas y que han revelado detalles de la colisión de las masas continentales antiguas, como las de Laurentia y Gondwana durante la configuración del megacontinente Pangea (Torres-Sánchez, 2015). Sin embargo, durante el periodo de acercamiento y colisión, Gondwana se fragmentó en diversos microcontinentes que fueron acrecionados a Laurentia y que dieron lugar a la formación de diversas cuencas continentales, generando piso oceánico y desarrollando arcos de islas y arcos continentales (Stampfli & Borel, 2002). Esta variedad de ambientes geológicas abre el camino a la formación de rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas que conforman al basamento cristalino de la Sierra Madre Oriental.

El basamento de la Sierra Madre Oriental consiste en cuatro unidades litológicas conformadas por: a) rocas precámbricas de la unidad metamórfica Gneis Novillo, b) el Complejo Metamórfico Paleozoico Esquisto Granjeno, c) secuencia clástico-pelítico-carbonatada deformada del Silúrico al Pérmico, y d) un cuerpo ígneo intrusivo de edad Paleozoica (Figura 2).

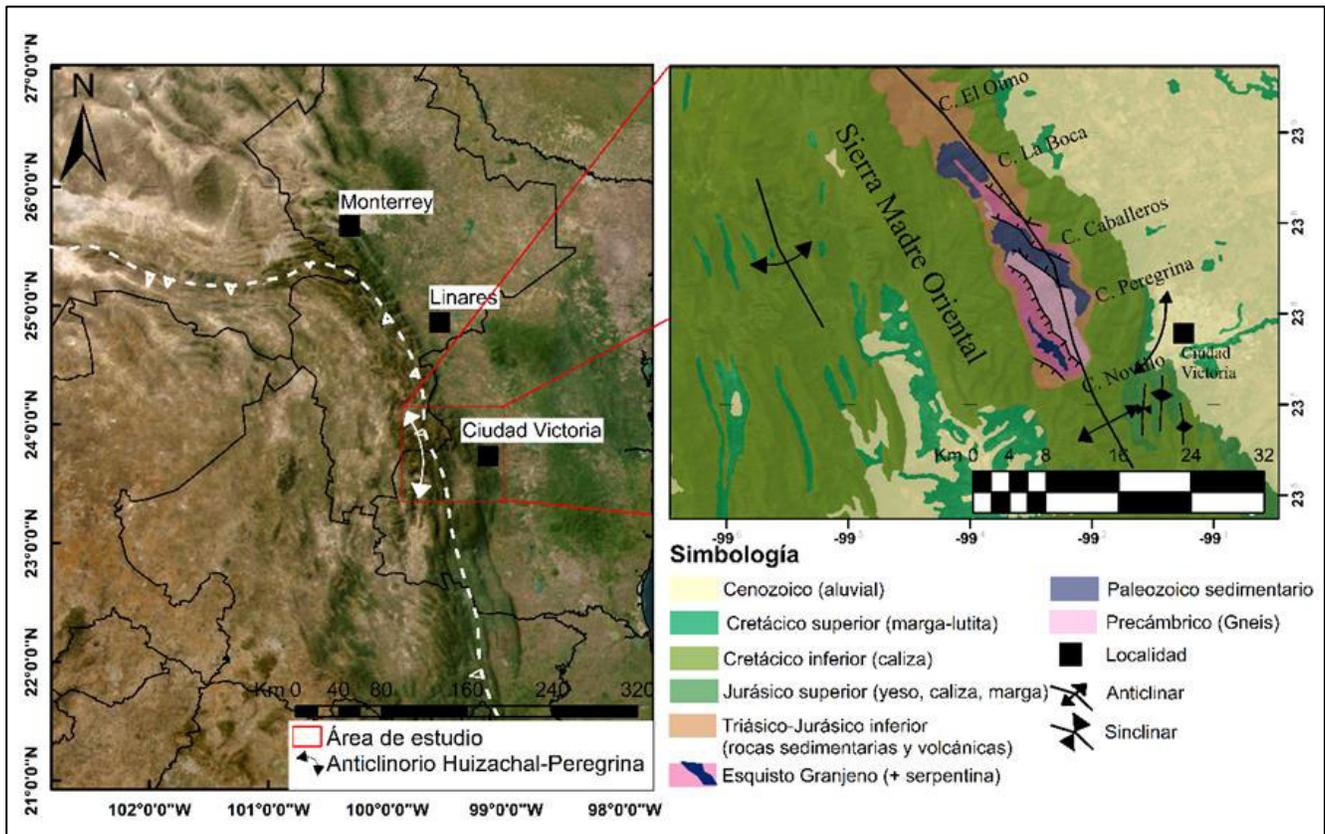


Figura 1: Mapa de localización.

El Complejo Metamórfico Paleozoico Esquisto Granjeno se conforma por rocas con protolitos sedimentarios (psammita, pelita, turbidita, conglomerado, grafito) e ígneos (toba, flujos de lava, lava almohadillada y cuerpos de rocas ultramáficas) (Torres-Sánchez, 2015).

Desde 1946 se han registrado descripciones e interpretaciones geodinámicas del Complejo Metamórfico Paleozoico Esquisto Granjeno, sin embargo, no se ha terminado de entender sobre los procesos relacionados con el origen y evolución del grafito. Por lo tanto, la atención de esta contribución se centra en estimar las condiciones de formación de la subunidad rica en grafito que conforma a este complejo metamórfico.

## ¿Qué es el grafito?

Antes de continuar habrá que entender que es el metamorfismo, el cual corresponde a un proceso geológico que da lugar a un cambio en la mineralogía, estructura,

microestructura y/o la composición de una roca original conocida como protolito, bajo el efecto de variaciones de temperatura y presión para formar así una nueva roca llamada roca metamórfica (Bucher, 2023). Continuando con el grafito, éste corresponde a la forma estable del carbono elemental en la superficie y en la corteza de la Tierra. El proceso de grafitización consiste en la transformación progresiva e irreversible de manera natural de material rico en carbono a grafito cristalino (Buseck & Beyssac, 2014). El mineral grafito es bastante conocido por ser el material principal de los lápices y puntillas que usamos para escribir, sin embargo, de manera natural se encuentra presente en diversas rocas de origen metamórfico e ígneo. El grafito es de color negro o, a veces, grisáceo, blando con dureza de 1 a 2 en la escala de Mohs, y se rompe fácilmente incluso aplicando ligera presión; tiene una textura grasosa, presenta un lustre o brillo de tipo metálico. Además, este mineral es un excelente conductor de electricidad o calor y puede soportar temperaturas extremas (Pellant, 2002).

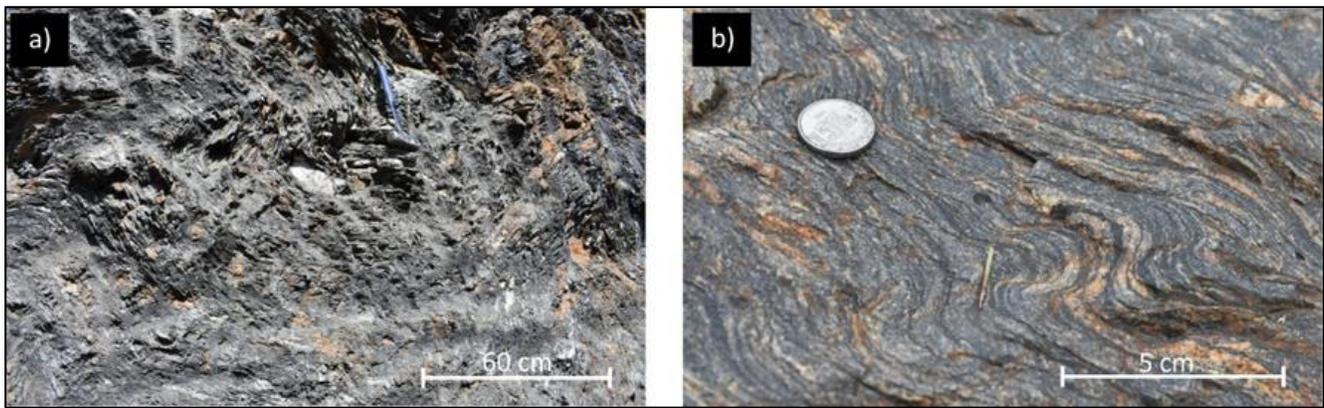


Figura 2: Fotografías de campo del esquisto grafitico, a) afloramiento masivo con tonalidad oscura, b) estructura de crenulación en el esquisto grafitico.

Se conoce que las rocas de tipo metasedimentarias pueden contener en su composición material carbonoso derivado de la evolución de la materia orgánica originalmente presente en el protolito (Beysac et al., 2002). Para poder llevar a cabo el proceso de grafitización se requiere que una roca haya sido afectada por metamorfismo, esta es una razón por la cual el carbono grafitico se encuentra principalmente en rocas formadas en cinturones orogénicos (Beyssac et al., 2002). Una oportunidad para utilizar la geotermometría y cuantificar las temperaturas metamórficas desde el metamorfismo de bajo grado (~330 °C) hasta el metamorfismo de alto grado (~650 °C), la ofrece el estudio del carbono grafitico. Como se ha descrito previamente en el Complejo Metamórfico Paleozoico Esquisto Granjeno es posible reconocer una subunidad litológica rica en grafito y material carbonoso finamente disperso, plegado y con estructuras de crenulación.

## Metodología

Se recolectaron muestras en las diversas localidades en donde afloran estas rocas y se seleccionaron las muestras más homogéneas y sin rastros de alteración superficial. Para analizar las texturas de las rocas y las propiedades ópticas de cada mineral que permite establecer las fases minerales presentes en las rocas se elaboraron a partir de estas muestras rocosas láminas delgadas según los procedimientos estandarizados por los laboratorios de preparación de la Facultad de Ciencias de la Tierra (UANL), la Universidad Friedrich-Schiller en Jena, Alemania y la Facultad de Ingeniería (UASLP). El análisis petrográfico de láminas delgadas se efectuó con el uso de microscopios de luz polarizada marca Leica modelo DM750P. El análisis de química mineral se realizó con un equipo de microsonda electrónica (EMPA), modelo CAMECA SX50, en el Instituto de Mineralogía-Carl

Zeiss Universidad Friedrich-Schiller Jena, Alemania, utilizando los estándares de silicatos y óxidos con condiciones de voltaje de excitación de 15.0 kV, un haz de corriente de 15 nA y de diámetro de 2.3  $\mu\text{m}$  (10  $\mu\text{m}$  para análisis de albita). Para el análisis de espectroscopía Ramán se manejó un equipo modelo Thermo Scientific DXR, con un diodo láser con longitud de onda de 532 nm, en el Instituto de Geociencias de la Universidad Friedrich-Schiller Jena, Alemania y en el Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica. El proceso de análisis es automatizado y se ejecuta por medio del software OMNIC y para cada espectro se calculó la relación de áreas ( $R2 = A_{D1}/(A_G + A_{D1} + A_{D2})$ ), donde A es el área del pico, la banda G es la principal banda de alta frecuencia del grafito, y las bandas D1 y D2 son bandas de defectos observadas en el espectro Raman de primer orden del grafito (Buseck & Beyssac, 2014; Wopenka & Pasteris, 1993).

## Resultados

### Esquisto Grafítico

El esquisto grafítico se caracteriza por tener una tonalidad gris oscura a negra, así como brillo lustroso (Figura 2a), se presenta en afloramientos que varían desde los 10 cm hasta los 5m en espesor con estructuras de crenulación (Figura 2b). Debido a sus espesor y presencia en todas las localidades indica una distribución de una cuenca que comparten ambientes de deposición similares y que de acuerdo con sus características y estructuras fue afectado por al menos 3 episodios de diverso grado de metamorfismo durante el proceso geológico regional que lo formó.

### Petrografía y análisis de microsonda

Las fases mineralógicas que componen al esquisto grafítico consisten principalmente de los minerales metamórficos cuarzo (Qz)+muscovita (Mu)+ grafito (Gr)+fengita (Fen) $\pm$ clorita (Cl) $\pm$ albita (Ab) $\pm$ Tur $\pm$ Zr (Figuras 3a y 3b). El esquisto grafítico presenta en lámina delgada textura lepidoblástica y microestructuras de crenulación de tipo asimétrica (Figura 3b), así como bandeamiento de los minerales de muscovita, grafito y clorita que a su vez bordean a porfidoblastos de albita y cuarzo. El cuarzo puede llegar a presentarse con formas hexagonales y con bordes de sutura, en forma de listones y bandas. En los porfidoblastos de albita se identifican sombras de presión e inclusiones de grafito, mica y/o cuarzo posicionadas en dirección oblicua a la foliación principal.

### Espectroscopía Ramán

Los espectros Ramán obtenidos presentan intensidades típicas de  $G=1580\text{ cm}^{-1}$ ,  $D1=1350\text{ cm}^{-1}$  and  $D2=1620\text{ cm}^{-1}$

(Figura 4a), los cuales corresponde a procesos de grafitización que pueden ocurrir en rangos de térmicos de 300°C y 600°C. Mientras que los valores de la relación ID/IG son de 0.54 a 2.30 (Figura 4b).

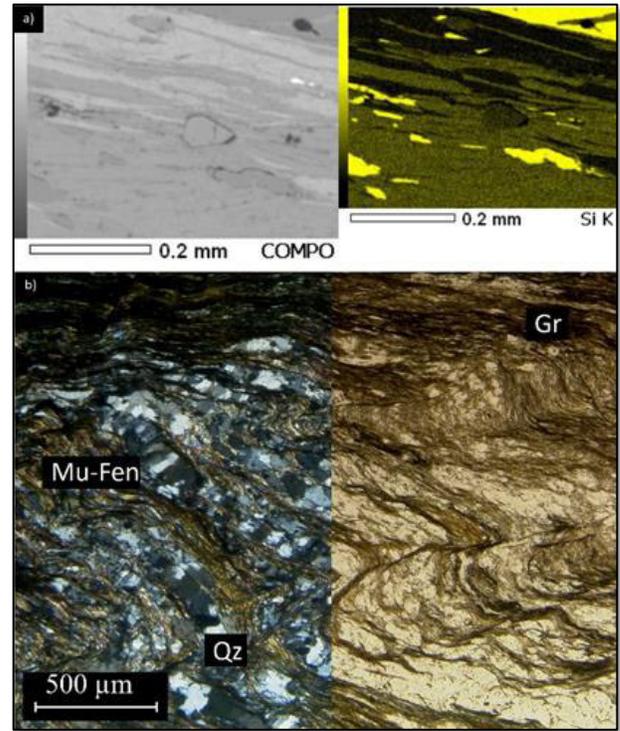


Figura 3: a) Mapa composicional para Si, b) Microfotografía del esquisto de grafito con textura lepidoblástica y crenulación asimétrica.

## Discusión

Las rocas grafíticas del CMPEG se encuentran distribuidas en todas las localidades donde este complejo metamórfico aflora, lo que podría indicar que durante la formación de estas rocas existía un ambiente de depósito rico en carbono, en el cual se conservó una cantidad de materia orgánica significativa previamente al proceso de metamorfismo regional que afectó a todas las subunidades. De acuerdo con las fases minerales accesorias como la turmalina y el zircón un transporte de sedimentos cercanos este material pudo acumularse en una cuenca de tipo continental, relacionada a la periferia del suroeste de Gondwana. Las rocas grafíticas presentan evidencia de un proceso metamórfico de tipo regional. evidencia de metamorfismo de alta presión en las rocas metasedimentarias de todas las áreas están presentes como cuarzo poligonal e inclusiones de cuarzo, grafito y mica blanca orientadas de manera oblicua a la foliación de la matriz en los porfidoblastos de albita, mientras que las condiciones retrógradas pueden representarse por sombras de presión y la presencia de cuarzo suturado en bandas y como listones.

De acuerdo con los resultados obtenidos por la espectroscopía Ramán, las condiciones de grafitización se llevaron a cabo bajo condiciones térmicas de 300-600°, mientras que los bajos valores de la relación ID/IG corresponden y concuerdan con el metamorfismo inicial de bajo grado (Buseck & Beyssac, 2014). De acuerdo con la presencia de fengita se

sugieren condiciones de presión de 2.5 kbar. Indicando al menos un episodio de metamorfismo con condiciones térmicas más altas que las propuestas previamente por otros autores.

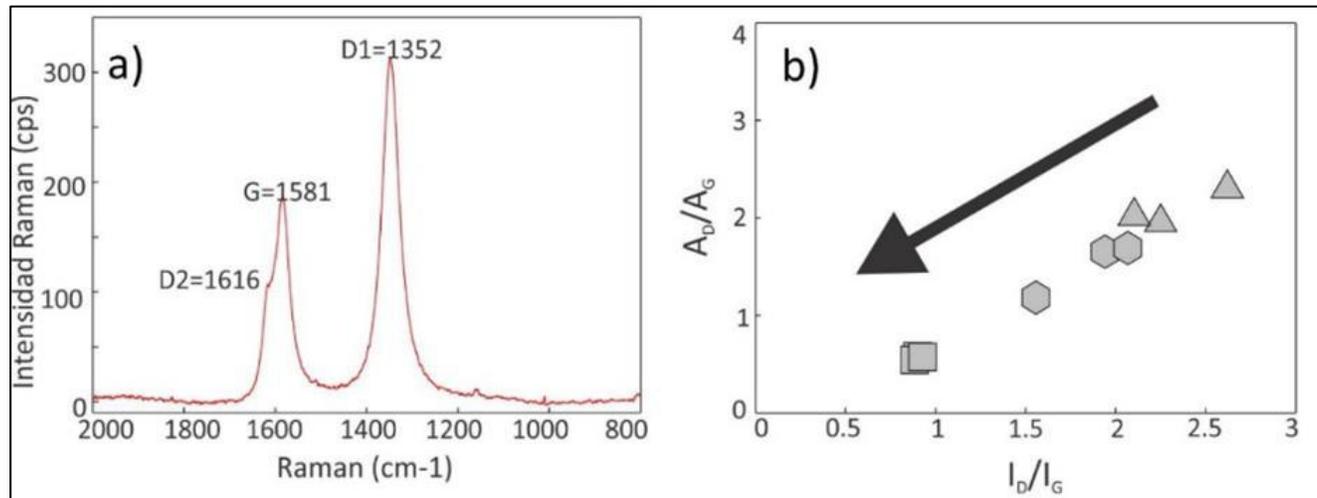


Figura 4: Resultados de la espectrometría Ramán. a) Espectro Ramán, b) comparación de las relaciones de las intensidades Ramán de ID/IG vs AD/AG basado en [8]. El cuadro representa a muestras de las localidades del Cañón Peregrina, el hexágono al Cañón Caballeros y el triángulo al Cañón Novillo.

## Conclusiones

Concluimos que la composición química de las rocas grafiticas del Complejo Metamórfico Paleozoico Esquisto Granjeno refleja principalmente sus posibles fuentes y su ambiente de depósito previo al metamorfismo, los cuales están estrechamente relacionados con bloques continentales cercanos a la periferia de Gondwana y Oaxaquia, en donde se desarrollaron ambientes marino anóxico y profundos que fungieron como depocentros de prolífica vida microbiana y ricas fuentes de materia orgánica. Que fueron afectados por metamorfismo de alto grado y regional durante el cierre final de Pangea. El entendimiento del complejo metamórfico de Esquisto de Granjeno nos permite proponer que contiene rocas precursoras tanto de afinidad continental y un paquete estratigráfico de la placa oceánica que estaba próximo a un continente.

## Referencias

Beyssac, O., Rouzaud, J.N., Goffé, B., Brunet, F. & Chopin, C. (2002): Graphitization in a high-pressure, low-temperature metamorphic gradient: a Raman microspectroscopy and HRTEM study. – *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **143**: 19-31.

- Bucher, K. (2023): *Petrogenesis of metamorphic rocks*. – Freiburg, Germany (Springer Nature).
- Buseck, P.R. & Beyssac, O. (2014): From organic matter to graphite: Graphitization. – *Elements*, **10(6)**: 421-426.
- Dewey, J.F. & Windley, B.F. (1981): Growth and differentiation of the continental crust. – *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A: Mathematical and Physical Sciences*, **301**: 189-206.
- Eguiluz de Antuñano, S., Aranda-García, M. & Marrett, R. (2000): Tectónica de la Sierra Madre Oriental, México. – *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, **53(1)**: 1-26.
- Marín-Lechado, C., Pedrera-Parias, A., Pérez-Muñoz, A.B., Rodríguez-Fernández, L.R., Rubio-Campos, J.C., Ruiz-Constán, A. & Villalobos-Megía, M. (2017): Parque Nacional de Sierra Nevada. – guía geológica.
- Pellant, C. (2002): *Smithsonian handbooks rocks and minerals*. – (Dorling Kindersley).
- Stampfli, G.M. & Borel, G.D. (2002): A plate tectonic model for the Paleozoic and Mesozoic constrained by dynamic plate boundaries and restored synthetic oceanic isochrons. – *Earth and Planetary Science Letters*, **196(1-2)**: 17-33.
- Torres Sánchez, S.A. (2015): Implicaciones geodinámicas del Complejo Metamórfico Paleozoico de la Sierra Madre

Oriental en el Noreste de México. – Tesis Doctoral, UANL, FCT: 300 p. Linares, N.L.

Wopenka, B. & Pasteris, J.D. (1993): Structural characterization of kerogens to granulite-facies graphite: applicability of Raman microprobe spectroscopy. – *American Mineralogist*, **78(5-6)**: 533-557.