

# Caracterización, significado e implicaciones paleoclimáticas de los paleosuelos ferralíticos de la Formación Frontada (Berriasiense superior, Grupo Campóo, Cuenca Vasco-Cantábrica)

*Characterization, significance and palaeoclimatic implications of the ferralithic soils of the Frontada Formation (upper Berriasien, Campóo Group, Basque-Cantabrian basin)*

Jose M<sup>o</sup> Hernández<sup>1</sup>, Victoriano Pujalte<sup>2</sup> y Sergio Robles<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Fundación Cristina Enea, P<sup>o</sup> Duque de Mandas 66, 20012 San Sebastián, Gipuzkoa. josem\_hernandez@donostia.eus

<sup>2</sup>Departamento de Estratigrafía y Paleontología, facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad del País Vasco UPV/EHU, Barrio Sarriena s/n, 48940, Leioa, Bizkaia. victoriano.pujalte@ehu.eus, sergio.robles@ehu.eus

## ABSTRACT

The Frontada Formation (Campóo Group) presents an important amount of structures related to the migration and precipitation of iron in its alluvial floodplain sedimentary record. These pedogenical features are associated with processes of intense chemical weathering of the substrate and establishment of hydromorphic soils. The analysis of these structures has allowed us to deduce how they were generated, as well as to propose a genetic model to explain their origin. This model suggests a context of high climatic humidity and temperature, similar to the nowadays equatorial climate, under which the ferricretization processes occurred.

**Key-words:** ferralithic palaeosoils, palaeoclimatology, upper Berriasian, Aguilar Basin.

## RESUMEN

La Formación Frontada (Grupo Campóo) muestra numerosas estructuras relacionadas con la migración y precipitación de hierro en sus facies de orla aluvial distal y llanura de inundación. Estos rasgos pedogénicos están asociados con procesos de intenso lavado químico del sustrato y establecimiento de suelos hidromorfos. El análisis de estas estructuras ha permitido deducir cómo se generaron, y establecer un modelo genético para explicar su origen. Con base en ello, se han podido inferir unas condiciones climáticas de alta humedad y temperatura, similares al clima ecuatorial actual, bajo el cual se generaron los procesos de ferricretización.

**Palabras clave:** paleosuelos ferralíticos, paleoclima, Berriasiense superior, Cuenca de Aguilar.

Geogaceta, 66 (2019), 23-26  
ISSN (versión impresa): 0213-683X  
ISSN (Internet): 2173-6545

Recepción: 28 de enero de 2019  
Revisión: 25 de abril de 2019  
Aceptación: 24 de mayo de 2019

## Introducción

La Formación Frontada supuso la continuación del relleno de la Cuenca de Aguilar durante la fase *Rift* del Jurásico Superior – Cretácico Inferior, tras la fase inicial de depósito de la Formación Aguilar. Ambas unidades muestran un carácter aluvio-palustre, si bien, en la Formación Frontada aparecen de forma muy abundante estructuras relacionadas con la removilización y emplazamiento de hierro durante la pedogénesis temprana. Estos elementos, vinculados siempre con paleosuelos, permiten establecer un modelo genético secuencial, así como deducir las condiciones climáticas existentes durante el Berriasiense superior.

## Contexto geológico

La Formación Frontada, de edad Berriasiense superior (Hernández *et al.*, 1999), es la más moderna de las dos unidades que constituyen el Grupo Campóo (Fig. 1), acumulado en la Cuenca de Aguilar (provincias de Palencia, Burgos y Cantabria). La unidad es el resultado del depósito de sistemas sedimentarios palustres, flanqueados por sistemas aluviales y culminados por un extenso sistema fluvial trenzado. En sus depósitos de orla aluvial y llanura de inundación son frecuentes las estructuras y rasgos que evidencian la circulación y concentración de hierro durante la sedimentación o inmediatamente después.

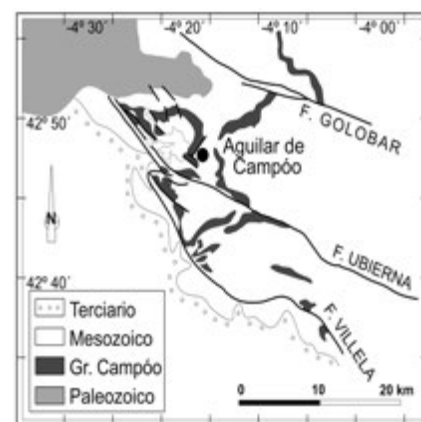


Fig. 1.- Mapa de afloramientos del Grupo Campóo en la cuenca de Aguilar.

Fig. 1.- Outcrop map of the Campóo Group in the Aguilar Basin.

## Caracterización de los paleosuelos ferralíticos

Las estructuras relacionadas con la migración de hierro de la Formación Frontada, aunque no exclusivamente, se encuentran de forma mayoritaria en el Miembro Tobares (Hernández *et al.*, 1999). Esta sub-unidad aluvial se desarrolló en los sectores suroccidental y central de la Cuenca de Aguilar, limitada por la Falla de Villela. Es eminentemente lutítica, si bien se intercalan niveles menores de calizas tabulares, rellenos de canal de clastos calcáreos (incluso conglomerados), silíceos o mixtos. En cualquier caso, la litología más abundante son las lutitas (más de un 90% del total), pudiendo llegar a alcanzar en algún tramo hasta 20 metros de potencia.

Los depósitos lutíticos presentan un característico bandeado de horizontes, de entre 3 y 4,5 m de espesor, según una secuencia de color recurrente, que de techo a muro es: violeta → beige → amarillo → naranja (Fig. 2A). Las bandas de color amarillo y naranja suelen presentar, sobre todo en las partes superiores, horizontes con estructura *pseudogley*, mientras que los bandeados de tonos beige y, sobre todo, violeta, muestran un amplia diversidad de estructuras ferralíticas. En general, estos depósitos se interpretan como la agradación de secuencias de decantación de flujos muy diluidos en llanuras de desbordamiento aluvial. En ellas, ocasionalmente se instauraron suelos hidromorfos, que dieron lugar a ferribandeados (bandas violeta y beige), entendiéndose como tal a los sedimentos ferruginosos no lateríticos originados por la migración y concentración de iones de hierro a través de la matriz (Germann *et al.*, 1994).

Los bandeados beige y violeta concentran la mayor parte de las estructuras ferralíticas, a saber:

### Nódulos ferralíticos

En las bandas de color beige, aparecen aislados y sin ningún tipo de disposición preferencial. Poseen formas subsféricas, y pueden llegar a alcanzar hasta 3 cm de diámetro. Estructuralmente están constituidos por una envuelta exterior de goethita de menos de 1 mm de grosor, que encierra un núcleo lutítico, que en ocasiones cobija algún pequeño oolito ferralítico (Fig. 2B). Por su parte, en las bandas de color violeta, los nódulos se concentran en niveles subhori-

zontales, son densos (Fig. 2C) y están constituidos íntegramente por impregnaciones de óxidos de hierro, sobre todo goethita.

Los nódulos, incipientes y maduros, se originaron por la concentración de iones de hierro en suelos hidromorfos más o menos desarrollados. Básicamente el proceso consistiría en la liberación de iones de hierro por meteorización de minerales ferromagnesianos, seguido de la migración, remplazamiento y recristalización en forma de goethita por deshidratación (PiPujol y Buurman, 1994). Los iones de hierro poseen una gran facilidad para circular mediante flujos acuosos por una matriz homogénea, sin desorganización estructural física o biológica (Kraus y Aslan, 1993).

### Niveles oolítico-pisolíticos

Se trata de niveles con rápido acuñamiento lateral, de hasta 20 cm de potencia máxima, que se intercalan entre el material lutítico de color violeta. Están constituidos por la concentración de oolitos (máx. 0,5 mm) y pisolitos ferruginosos (2-4 mm y máximo 1 cm) y, en menor medida, por granos de cuarzo (máximo 1 cm). Presentan textura granosostenida y la porosidad está ocluida por una matriz oscura de óxidos de hierro y carbonato cálcico (Fig. 2D). Tanto los oolitos como los pisolitos, muestran morfologías muy irregulares, deformadas y aplastadas, pero sin alinearse en un plano preferencial. No muestran un núcleo bien definido, y la zona central suele presentar contenidos más altos en carbonato que las envueltas. Análisis mediante difracción de rayos X han demostrado que las envueltas están constituidas mayoritariamente por goethita. Ocasionalmente, se encuentran oolitos ferruginosos aislados en los bandeados de color beige y violeta.

Carozzi (1972) demostró que oolitos y pisolitos ferruginosos con alta variabilidad en su tamaño, complejidad interna, interferencia recíproca, fuerte deformación e inclusión en una matriz lutítica, son generados *in situ* mediante procesos de precipitación mineral pedogénica en suelos. Su estructura concéntrica es el resultado de la presión de confinamiento que ejercen los granos dispuestos a su alrededor, y la complejidad en las envueltas corticales es el producto de modificaciones centrípetas discontinuas en la matriz ferruginosa por generación gradual de envueltas (Taylor, 1992). De esta forma, la partícula pasaría por diferentes es-

tadios de neoformación, desde nódulos ferruginosos simples hasta oolitos y pisolitos (Achyuthan y Fedoroff, 2008), iniciándose los procesos de neoformación y reordenamiento del hierro sobre discontinuidades de la matriz. La agradación en forma de microenvueltas alrededor del núcleo podría indicar una cierta estacionalidad climática, con activación y desactivación de los procesos de precipitación del hierro (Delvigne, 1998).

### Ferricretas primarias

Son niveles de pocos decímetros de potencia localizados exclusivamente en bandeados de color violeta. Muestran una base nodular y progresan gradualmente en la vertical hasta configurar una matriz ferruginosa, opaca y densa de color rojizo negruzco, y a menudo brillo metálico (Fig. 2E). Esta matriz engloba granos de cuarzo dispersos que pueden presentar marcas de corrosión y fisuración, manteniendo la misma orientación óptica.

La generación de estos horizontes representa un estadio más avanzado que la formación de nódulos, oolitos y pisolitos de goethita. Se produjeron por la ferruginización de la matriz lutítica hasta llegar a formar una corteza madura. El proceso consistiría esencialmente en el incremento del contenido en hierro y el consiguiente empobrecimiento de los elementos arcillosos de la matriz.

Los granos de cuarzo habrían sido impregnados, intensamente corroidos e incluso fragmentados. Según Achyuthan y Fedoroff (2008), la formación de la costra ferralítica (ferricretización) tendría lugar bajo la influencia de un nivel freático fluctuante, aunque en general alto.

### Ferricretas secundarias

Están formadas por rellenos de canal, de 60 cm de potencia máxima y escasa extensión lateral, intercalados entre las facies lutíticas violeta. Están constituidas por granos de cuarzo de tamaño grava y arena, con frecuencia fracturados aunque en continuidad óptica. En menor proporción incluyen fragmentos milimétricos redondeados de ferricretas (Fig. 2F). En general, los litosomas, muestran una significativa cementación por óxidos (o hidróxidos) de hierro, lo que le confiere un característico color marrón oscuro, y una resistencia diferencial a la erosión.

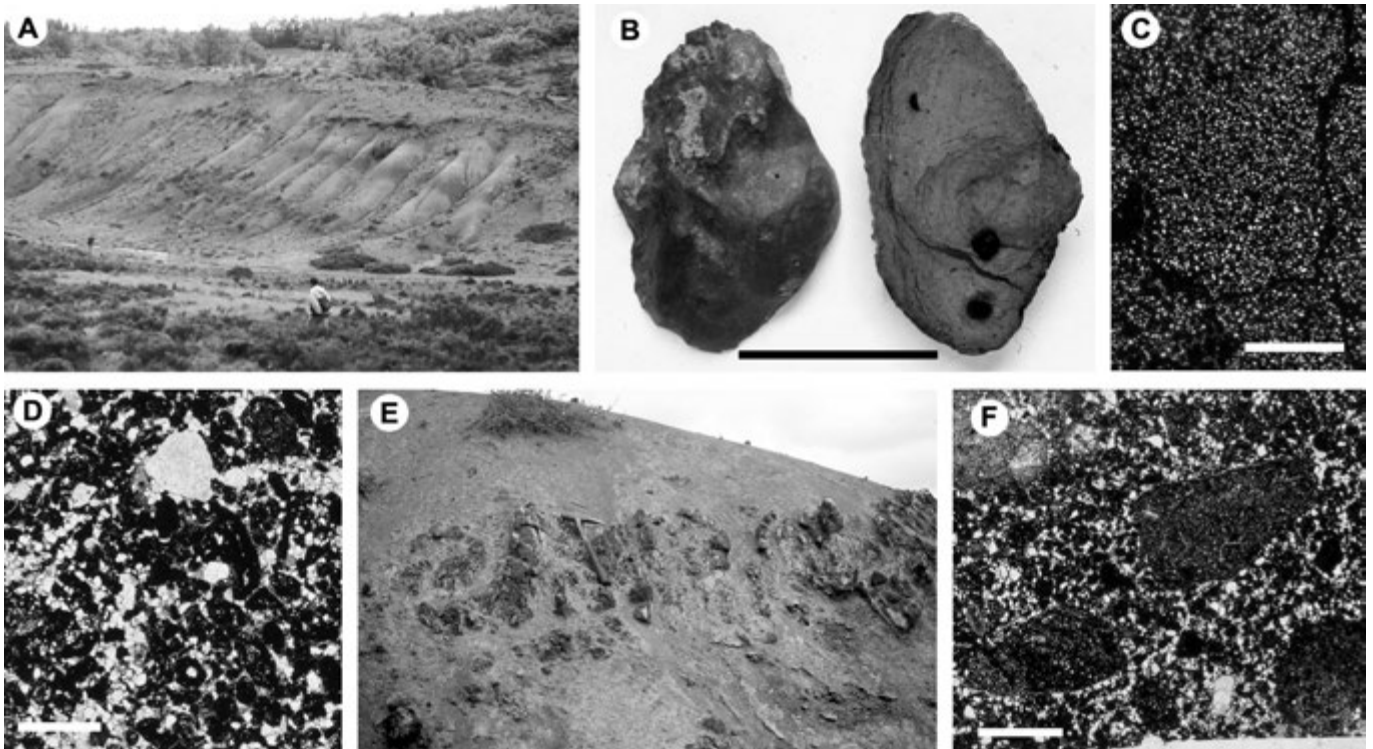


Fig. 2.- A) Aspecto de campo de las lutitas del Miembro Tobares. B) Nódulo inmaduro, con dos oolitos en su interior (barra = 2 cm). C) Textura microscópica de un nódulo maduro (barra = 5 mm). D) Oolitos ferruginosos (barra = 5 mm). E) Ferricreta primaria. F) Ferricreta secundaria (barra = 5 mm). Ver figura en color en la web.  
Fig. 2.- A) Field view of the lutites of the Tobares Member. B) Inmature nodule with two oolites inside (bar = 2 cm). C) Mature nodule microscopic feature (bar = 5 mm). D) Iron oolites (bar = 5 mm). E) Primary ferricrete. F) Secondary ferricrete (bar = 5 mm). See color figure in the web.

Se trataría de canales muy laxos que transportaban arena silíceo junto con fragmentos de costras ferralíticas primarias desarrolladas en zonas laterales. El origen de estas ferricretas secundarias no estaría relacionado con procesos de meteorización química, sino con una concentración mecánica de hierro a pequeña escala en depresiones locales (Wright *et al.*, 1992). La posterior precipitación de cementos ferruginosos que ocluyó la porosidad sí se podría deber a la circulación preferencial de fluidos ricos en hierro a través de estas áreas canalizadas, comparativamente más porosas que la matriz lutítica.

### Modelo genético

No existe un acuerdo generalizado sobre la génesis de las ferricretas, si bien, en la literatura científica son mayoría los modelos lineales que invocan procesos pedogénicos en escenarios climáticos monzónicos (Achyuthan y Fedoroff, 2008). Los datos de la Formación Frontada también permiten inferir un modelo genético lineal, aunque con variaciones locales.

Según este modelo, los procesos se desarrollarían en una llanura de inundación, constituida por depósitos detríticos finos

homogéneos, bien aireados y en los que existiría una oxidación generalizada del hierro (bandeados naranjas y amarillos). Sin embargo, el encharcamiento del sustrato de manera permanente (periodos de disminución de aportes clásticos) propiciaría la instauración de suelos hidromorfos (ferribandeados de color violeta y beige), produciéndose en ellos la reducción del hierro (Fig. 3).

Eventualmente, se produciría la percolación de agua a través de zonas de circulación preferente, desde el suelo hidromorfo hacia los niveles inferiores del sustrato, generándose horizontes *psudogley*. Estos horizontes se originarían por la transformación de los iones férricos (FeO III) en iones ferrosos (FeO II) y su precipitación alrededor de las vías de penetración del agua al variar las condiciones redox.

En cualquier caso, los bandeados de color violeta representarían los niveles del sustrato permanentemente inundados, mientras que los beige se generarían en la zona de transición con el sustrato seco y oxidado. En estos niveles inferiores del suelo hidromorfo (bandas de color beige) la precipitación del hierro se limitaría a delgadas envueltas de goethita alrededor de nódulos aislados, mientras que en las bandas de color violeta el hierro podría llegar a formar nódulos maduros densos por precipitación de óxidos de hierro que, even-

tualmente, evolucionarían a oolitos, pisolitos, y finalmente ferricretas.

Por su parte, las ferricretas secundarias representarían el depósito de flujos canalizados que transportaban arena y fragmentos de ferricretas primarias (ocasionalmente, oolitos y pisolitos aislados), ligados a reactivaciones de la sedimentación aluvial. La posterior circulación de aguas muy mineralizadas a través de los litosomas canaliformes, conllevaría la cementación por óxidos de hierro y la oclusión de la porosidad.

Finalmente, los datos de campo confirmarían que, si bien, en la Formación Frontada se dieron las condiciones para el movimiento y concentración de hierro, no se habría producido un verdadero proceso de laterización. La fuente del hierro habría estado situada en un área relativamente próxima, donde se estarían desarrollando verdaderos horizontes lateríticos. La localización exacta de estos niveles no ha sido posible, aunque podrían estar situados sobre los materiales del Mesozoico y/o Paleozoico circundantes a la Cuenca de Aguilar.

### Implicaciones paleoclimáticas

La presencia de estructuras relacionadas con la pedogénesis del hierro en las asociaciones de facies aluviales de la For-

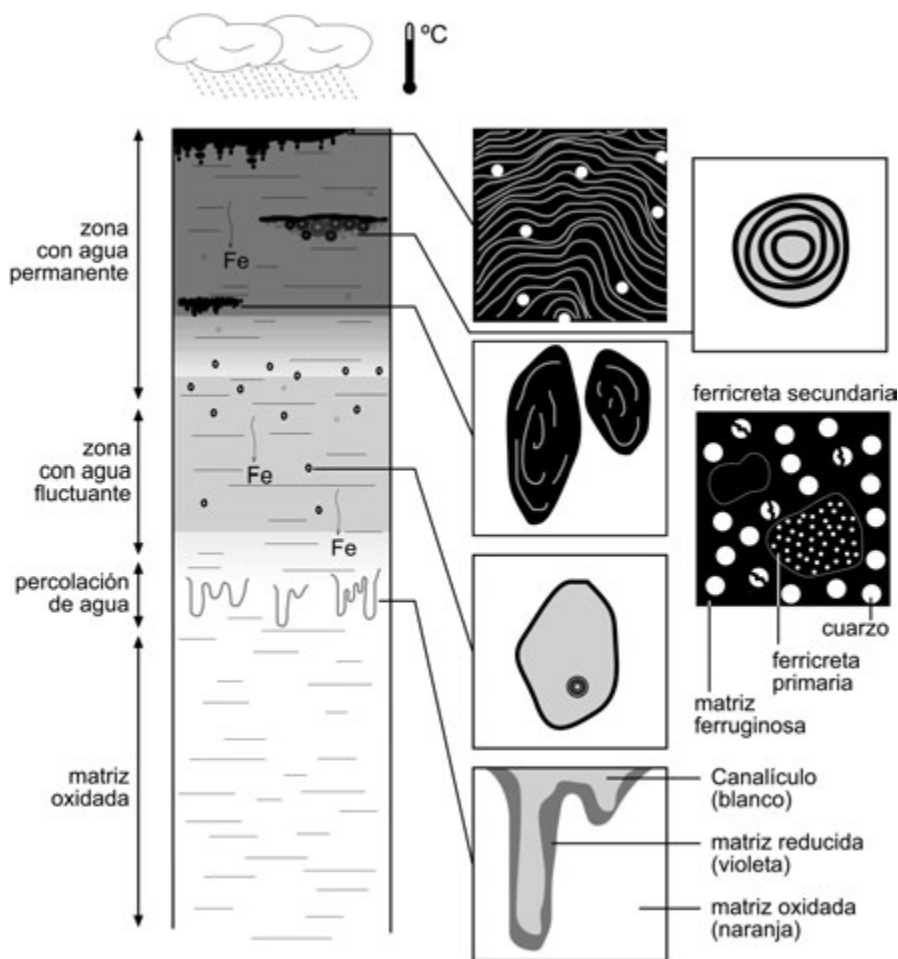


Fig. 3.- Modelo genético propuesto para los paleosuelos ferralíticos de la Formación frontada (explicación en el texto).

Fig. 3.- Genetic model proposed for the ferralithic palaeosoils of the Frontada Formation (see main text).

mación Frontada parece estar relacionada con una intensa meteorización química del sustrato en condiciones de alta humedad y temperatura (Achyuthan y Fedoroff, 2008). Este contexto climático sería similar a los que en la actualidad existen en zonas de baja latitud, como el Oeste de África (Schwarz, 1997), Brasil (Rosolen *et al.*, 2017), Australia (Löhr *et al.*, 2010) o India (Shah *et al.*, 2018).

Sobre la base de estos datos es razonable concluir que durante el depósito de la Formación Frontada (Berriasiense superior), en la Cuenca de Aguilar el clima tendría valores de temperatura y humedad elevados. Lo cual es congruente con los datos paleoclimáticos de otras cuencas continentales cercanas de edad similar, como las Cuencas de París, Wessex y Weald (Radley y Allen, 2012), en las que en el límite Berriasiense-Valanginiense se produjo una variación climática hacia condiciones de mayor humedad atmosférica, atribuida

a un efecto monzónico originado por la creación de un gran océano noratlántico, lo que favoreció la llegada de vientos húmedos desde el oeste.

### Conclusiones

Los frecuentes rasgos pedogénicos de removilización y precipitación de hierro que muestra la Formación Frontada (Grupo Campó), están relacionados con el establecimiento de suelos hidromorfos y la circulación en condiciones reductoras de aguas ricas en hierro a través del sustrato. Esto habría favorecido la generación de ferribandeos, nódulos de gohetita incipientes y maduros, y su evolución hacia oolitos, pisolitos y ferricretas. Eventualmente, se produjo la resedimentación y cementación de ferricretas secundarias por flujos canalizados.

Las condiciones climáticas bajo las que se desarrollaron estos procesos debían ser muy cálidas y húmedas, lo que favoreció el lavado químico del sustrato. Estas conclu-

siones coinciden con los paleoclimas propuestos para otras cuencas europeas cercanas de edad similar, y parecen estar relacionados con la apertura del Atlántico norte y la llegada de masas húmedas oceánicas (efecto monzónico).

### Agradecimientos

Los autores agradecen las sugerencias de Ana Rosa Soria y Ferran Colombo, que mejoraron sustancialmente la versión previa de este artículo.

### Referencias

- Achyuthan, H. y Fedoroff, N. (2008). En: *New Trends in Soil Micromorphology* (S. Kapur, A. Mermut y G. Stoops, Eds.). Springer, Berlin, Heidelberg, 111-136.
- Carozzi, A.V. (1972). *Microscopic Sedimentary Petrography*. John Wiley and Sons, New York, 485 p.
- Delvigne J.E. (1998). *Atlas of micromorphology of mineral alteration and weathering*. The Canadian Mineralogist Special Publication (en colaboración con ORSTOM), Ottawa y Paris, 509 p.
- Germann, K., Schwarz, T. y Wipki, M. (1994). *Geologische Rundschau* 83, 787-798.
- Hernández, J.M<sup>a</sup>, Pujalte, V., Robles, S. y Martín-Closas, C. (1999). *Revista de la Sociedad Geológica de España* 12(3-4), 277-296.
- Kraus, M. y Aslan, A. (1993). *Journal of Sedimentary Petrology* 63(3), 453-463.
- Löhr, S.C., Grigorescu, M., Hodgkinson, J.J., Cox, M.E. y Fraser, S.J. (2010). *Geoderma* 156, 253- 266.
- PiPujol, M.D. y Buurman, P. (1994). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 110, 103-113.
- Radley, J.D. y Allen, P.A. (2012). *Proceedings of the Geologists Association* 123(2), 245-318.
- Rosolen, V., Bueno, G.T., Melfi, A.J., Montes, C.R., de Sousa Coelho, C.V., Ishida, D.A. y Govone, J.S. (2017). *Journal of South American Earth Sciences* 79, 421-430.
- Schwarz, T. (1997). *Applied Geochemistry* 12, 119-131.
- Shah, R.A., Achyuthan, H., Jose, P., Lone, M. y Geethanjali, K. (2018). *Journal of Geological Society of India* 91, 411-417.
- Taylor, K.G. (1992). *Geological Magazine* 129(3), 349-358.
- Wright, V.P., Sloan, R.J., Valero Garcés, B. y Garvie, L.A.J. (1992). *Sedimentary Geology* 77, 37-49.