

Framboides de pirita como indicadores de condiciones redox en la Formación Lampazar (Cámbrico superior, Sierra de Cajas, Cordillera Oriental, Argentina)

Enzo Rubén MARCIAL^{1,2}, Virginia Helena ALBARRACÍN², Susana Beatriz ESTEBAN¹

Abstract: *PYRITE FRAMBOID AS INDICATOR OF REDOX CONDITIONS IN THE LAMPАЗAR FORMATION (UPPER CAMBRIAN, SIERRA DE CAJAS, CORDILLERA ORIENTAL, ARGENTINA).* The aim of the present work is to define the oxygenation levels during the sedimentation of the Lampazar Formation using pyrite framboids present in dark shales. For this, the analysis of fine facies was carried out by microscopy of thin sections and using scanning electron microscope (SEM). As a result, four facies were recognized; facies 1 massive black shales; facies 2: dark gray shales with fine parallel lamination; facies 3: dark gray - greenish shales with thin siltstone levels and facies 4: fine sandstones with parallel to undulitic lamination alternated with yellowish - green shales. It is interpreted that, throughout the sedimentation of the Lampazar Formation during the Upper Cambrian in the Sierra de Cajas, euxinic conditions prevailed on sea bottom waters (represented by facies 2), which through dilute bottom currents (facies 1 and 3) allowed oxygen to enter sporadically, which would explain the presence of trilobite fauna on the seafloor. These events became more frequent towards the upper part of the Lampazar Formation (facies 4) indicating a somerization of the marine platform.

Resúmen: El objetivo del presente trabajo es, definir los niveles de oxigenación durante la sedimentación de la Formación Lampazar utilizando los framboides de pirita presentes en las pelitas oscuras. Para ello, se realizó el estudio de las facies finas de la formación Lampazar mediante microscopia de cortes delgados y al microscopio electrónico de barrido (MEB). Como resultado se reconocieron cuatro facies; facies 1: pelitas negras masivas; facies 2: pelitas gris oscuras con laminación fina paralela; facies 3: pelitas gris oscuras - verdosas con delgados niveles de limo y facies 4: Areniscas finas con laminación paralela a ondulítica intercaladas con pelitas verde - amarillentas. Se interpreta que, durante la sedimentación de la Formación Lampazar en el Cámbrico superior en la sierra de Cajas, predominaban las condiciones euxínicas en el fondo marino (representadas por la facies 2), las cuales mediante corrientes de fondo diluidos (facies 1 y 3) permitían el ingreso de oxígeno de manera esporádica, lo que explicaría la presencia de la fauna de trilobites en el fondo marino. Estos eventos se hicieron más frecuentes hacia la parte superior de la formación Lampazar (facies 4) indicando una somerización de la plataforma marina.

Key words: Lampazar. Framboids. Redox. Oxygenation.

Palabra clave: Lampazar. Framboides. Redox. Oxigenación.

¹ Instituto Superior de Correlación Geológica, Universidad Nacional de Tucumán, Conicet.

² Centro Integral de Microscopía Electrónica, Universidad Nacional de Tucumán, Conicet.

Autor correspondiente: Enzo Rubén MARCIAL. Dirección Postal: Jujuy 362, 6 E. San Miguel de Tucumán, 4000. E-mail: enzomarc7@gmail.com

Introducción

Las estructuras framboidales formadas por pirita (Fe_2S) han sido definidas por distintos autores basándose en su morfología y tamaño (Schallreuter, 1984; Sassano y Schrijver, 1989; Wilkin y Barnes, 1997). El término framboide deriva de la palabra francesa framboise (que significa frambuesa), introducido por Rust (1935) para describir un conjunto de pequeños cristales de pirita que muestran gran similitud con este fruto. En general, se define como framboide a un conjunto esférico o subsférico de cristales micrométricos a submicrométricos densamente empaquetado. Se han encontrado en distintos ambientes, desde sedimentos modernos (marinos, lacustres y hasta en fumarolas del fondo marino), rocas sedimentarias, metamórficas y hasta en depósitos magmáticos e hidrotermales, pero su ambiente más representativo es el de sedimentos marinos ricos en materia orgánica (Sawlowicz, 2000).

Los framboides de pirita comienzan a formarse en la columna de agua y/o durante la diagénesis temprana (Skei, 1988; Canfield y Raiswell, 1991). En ambientes euxínicos se forman en la columna de agua y en el sedimento del fondo marino, mientras que en ambiente marinos normales (sin restricción de oxígeno) se forman únicamente en el sedimento (Canfield *et al.*, 1986; Wilkin y Barnes, 1997; Suits y Wilkin, 1998; Sawlowicz, 2000; Lyons y Se-vermann, 2006). Es común encontrar en rocas sedimentarias tanto framboides como cristales euhedrales de pirita, generalmente del mismo tamaño (Sawlowicz, 2000); sin embargo, los cristales euhedrales son más abundantes en ambientes óxicos o disóxicos.

La distribución de tamaño de los framboides aporta información acerca de los niveles de oxigenación del ambiente en el cual se han formado y debido a que no es afectada por procesos diagenéticos o por sobrecrecimiento, es un buen indicador de condiciones redox incluso en rocas del paleozoico. (Wilkin *et al.*, 1996; Wilkin *et al.*, 1997; Wignall y Newton, 1998; Wilkin y Arthur, 2001; Shen *et al.*, 2007; Bond y Wignall, 2010;

Wignall *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2012; Wei *et al.*, 2015; Yang *et al.*, 2016; Huang *et al.*, 2017).

Los ambientes marinos deficientes en oxígeno no son comunes en la actualidad; sin embargo, han sido importantes a lo largo de la historia geológica de nuestro planeta, asociado a extinciones masivas marinas y terrestres (Wignall *et al.*, 2005; Shen *et al.*, 2007; Wignall *et al.*, 2010; Bond y Wignall, 2010). En general, están relacionados a períodos climáticos cálidos y a la distribución de los continentes (Meyer y Kump, 2008).

En el norte de Argentina se han descritos ambientes marinos deficientes en oxígeno, representados por pelitas oscuras de edad furongiana y tremadociana, tales como la Formación Santa Rosita y equivalentes (Buatois y Mángano, 2003; Buatois *et al.*, 2003; Moya *et al.*, 2003), la Formación Volcancito (Tortello y Esteban, 2007) y la Formación Lampazar (Harrington, 1957; Tortello y Esteban, 2003; Esteban y Tortello, 2007). El perfil tipo de la Formación Lampazar se ubica en la sierra de Cajas, y es descrito por Aceñolaza (1968) como el más representativo de esta unidad.

Las facies sedimentarias correspondientes a ambientes deficientes de oxígeno de la Formación Lampazar han sido definidas solamente basándose en el color, textura y estructuras sedimentarias (Tortello y Esteban, 2003; Esteban y Tortello, 2007); por lo tanto, el objetivo del presente trabajo es definir con mayor precisión los niveles de oxigenación de estos ambientes, utilizando los framboides de pirita presentes en las facies de pelitas oscuras de la Formación Lampazar.

Marco geológico

La Cordillera Oriental es una provincia geológica ubicada en el norte de Argentina y se caracteriza por grandes láminas de corrimiento descriptas originalmente por Keidel (1943). Esta provincia geológica está compuesta por un zócalo proterozoico formado por la Formación Puncoviscana, sobre el cual

se apoyan en discordancia angular sedimentos siliciclásticos pertenecientes al Grupo Mesón (Turner, 1960; Sánchez y Salfity, 1994; Sánchez y Salfity, 1999). Por encima del Grupo Mesón se depositan sedimentos marinos del Ordovícico del Grupo Santa Victoria (Turner, 1960) y equivalentes. Posteriormente, durante el Cretácico - Paleógeno una importante cuenca sedimentaria acumuló los sedimentos del Grupo Salta (Turner, 1958).

En el sector occidental de la Cordillera Oriental se encuentra la sierra de Cajas, cuatro kilómetros al este de la localidad de El Aguilar, en la provincia de Jujuy. La sierra de Cajas fue descrita por Aceñolaza (1968) como un amplio anticlinal volcado al oeste (Figura 1) donde las rocas aflorantes más antiguas pertenecen a la Formación Padrioc (Cámbrico superior), compuesta por ortocuarzitas blanquecinas y rosáceas en estratos tabulares, con estructuras internas de tipo artesa (Aceñolaza, 1968). Esta unidad se asigna a un paleoambiente marino somero y es equivalente a la Formación Chalhualmayoc (unidad superior del Grupo Mesón) de edad cámbrica (Aceñolaza, 1966). En concordancia sobre la Formación Padrioc, se depositó una secuencia fosilífera de lutitas negras y grises con intercalaciones de areniscas y areniscas carbonáticas que recibe el nombre de Formación Lampazar, equivalente al tramo inferior de la Formación Santa Rosita. Por encima de la Formación Lampazar se encuentra la Formación Cardonal (Harrington, 1937), compuesta por areniscas, cuarcitas y calizas, que afloran únicamente en el flanco oriental de la sierra de Cajas. En la Formación Cardonal se encuentra el límite cambro - ordovícico determinado mediante restos fósiles (Tortello *et al.*, 1999). Por último, coronando la secuencia estratigráfica, se encuentra una sucesión de lutitas grises y amarillentas y areniscas pertenecientes a la Formación Acoite (Turner, 1964) del Floiano inferior.

- Formación Lampazar

Fue definida por Harrington (1957), como una unidad de 100 m de espesor constituida por lutitas gris oscuras a verde oliva finamente bandeadas con niveles más claros de limo, que contienen bancos intercalados de areniscas gris - verdosas friables, más o menos dispersas a lo largo de toda la sucesión. Esta formación ha sido ampliamente estudiada debido a su alto contenido fosilífero (Aceñolaza y Nieva, 2001; Tortello y Esteban, 2003; Esteban y Tortello, 2007 y referencias).

Aceñolaza (1968) describió los afloramientos de la Formación Lampazar en la sierra de Cajas (quebrada Azul) como una sucesión principalmente compuesta por pelitas con intercalaciones de bancos arenosos generalmente delgados en los tramos medio y superior. Tortello y Esteban (2003) indican que la Formación Lampazar representa un ambiente de plataforma externa con una transición hacia ambientes más someros en la parte cuspidal. Tortello y Esteban (2003) describen las facies sedimentarias de la Formación Lampazar según los aspectos litológicos, estructuras primarias, geometría de los cuerpos y contenido fósil, y en las facies sedimentarias más finas tienen en cuenta el color, ya que se observa un contraste bien definido entre ellas. Los sedimentos de grano fino varían desde lutitas negras y gris oscuro laminadas en la parte inferior de la formación hasta lutitas verdes laminadas con intercalaciones de limolitas y areniscas en los tramos medio y superior (Tortello y Esteban, 2003). Se considera que, durante el depósito de esta unidad, los niveles de oxigenación y energía no fueron constantes (Tortello y Esteban, 2003).

Materiales y métodos

- Análisis micro facial

En este trabajo se estudiaron las facies finas y oscuras de la Formación Lampazar, constituidas principalmente por lutitas negras y gris oscuras laminadas. Para su descripción se han tenido en cuenta cambios a pequeña escala tanto

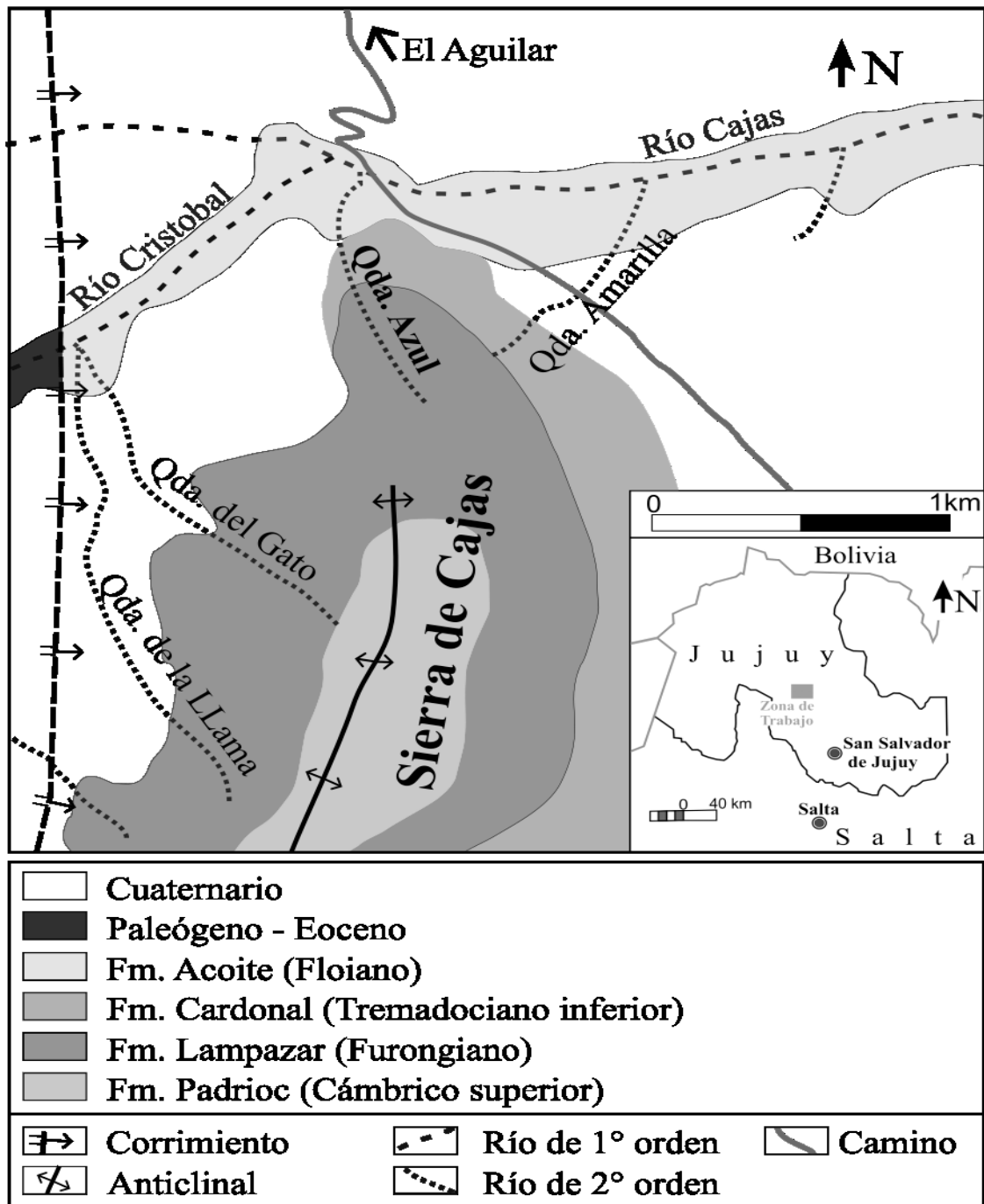


Figura 1. Mapa geológico de sierra de Cajas. / Figure 1. Sierra de Cajas geological map.

en el aspecto litológico, texturales, presencia de estructuras sedimentarias y color. Se relevó un perfil de 20 metros constituido principalmente por pelitas negras en el tramo inferior, pelitas gris oscuras con delgados niveles de limo en el tramo medio y medio superior, y pelitas verde-amarillentas con intercalaciones de capas de

areniscas muy finas a finas en la parte superior. Para el estudio de las condiciones redox se tomaron muestras representativas de cada facies de pelitas oscuras determinadas. Las observaciones de campo fueron complementadas con análisis de cortes delgados y pulidos calcográficos que fueron estudiados con un microscopio

petrográfico modelo Nikon Eclipse 50i POL, perteneciente al Instituto Superior de Corrección Geológica (CONICET - UNT). En los cortes delgados se estudiaron los minerales traslúcidos mediante iluminación diascópica, y en los pulidos calcográficos, los minerales opacos mediante iluminación episcópica.

- Análisis de los Framboides de Pirita

Para el estudio de los framboides de pirita, las muestras fueron tratadas con resina epoxi, generando bloques que luego fueron pulidos para su observación bajo el microscopio electrónico de barrido (MEB) marca Zeiss, modelo Gemini Supra 55vp, perteneciente al Centro Integral de Microscopía Electrónica (CIME - CONICET - UNT).

Se analizaron las distintas facies y se determinó la presencia o ausencia de framboides mediante la técnica de detección de electrones retrodispersados o BSD (por sus siglas en inglés *Backscattered electron detector*), sensible a las variaciones del número atómico de los elementos, es decir, las regiones observadas de las muestras compuestas por elementos de mayor peso atómico (por ej., Fe₂S) tendrá un color más claro respecto a aquella de peso atómico menor (por ej., C, Si o Al). En cada muestra, se midieron al menos 100 framboides (siempre que la muestra así lo permitiera), a lo largo de transectas de aproximadamente 1 cm perpendiculares a la laminación. Posteriormente, se determinó la distribución de sus tamaños, diámetro promedio, diámetro máximo y la desviación estándar.

- Framboides de pirita como indicadores de ambientes redox

El análisis de la distribución de tamaño de los framboides es un método efectivo para determinar las condiciones de oxigenación durante el depósito de los sedimentos (Wilkin *et al.*, 1996; Wilkin *et al.*, 1997; Wignall *et al.*, 2005; Bond y Wignall, 2010; Wignall *et al.*, 2010; Blood y Lash, 2015; Huang *et al.*, 2017). Los framboides que se forman dentro de columnas de aguas sin oxígeno y con la presencia de H₂S, debido a su alta

densidad, crecen hasta alcanzar tamaños pequeños de alrededor de 7 µm antes de hundirse hasta el lecho marino, esto da lugar a distribuciones de tamaño pequeño con un rango estrecho de variación (Wilkin *et al.*, 1996). En ambientes con mayor contenido de oxígeno, los framboides ya no se forman en la columna de agua, sino debajo de la interfaz agua - sedimento donde pueden crecer a tamaños mayores. En ambientes completamente oxigenados, los framboides no se encuentran presentes (Wilkin *et al.*, 1996).

En la literatura científica, se han propuesto cinco estados redox diferentes utilizando una combinación de indicadores. Entre ellos, se utilizan los framboides de pirita, junto con características sedimentológicas, como la conservación de la laminación fina en los sedimentos, para distinguirlos (Bond y Wignall, 2010). Además, también se ha utilizado el diámetro máximo de los framboides para caracterizar estos estados, ya que en ambientes óxicos o disódicos se espera que los diámetros máximos sean mayores que en ambientes anódicos o euxínicos (Wilkin *et al.*, 1996; Wilkin *et al.*, 1997; Wignall y Newton, 1998; Wei *et al.*, 2015).

El primer estado se caracteriza por framboides abundantes, pequeños (con un diámetro promedio entre 3 - 5 µm) y con un rango de tamaño estrecho, representa un ambiente euxínico, es decir, la columna de agua en el fondo marino es persistentemente sulfídica y sin oxígeno (Bond y Wignall, 2010; Huang *et al.*, 2017). Si los framboides son pequeños (4 - 6 µm de diámetro promedio), abundantes y con algunos framboides más grandes indican un estado anódico, donde la columna de agua en el fondo marino no contiene oxígeno. Un tercer estado se define cuando los framboides tienen un diámetro promedio entre 6 - 10 µm, con algunos framboides de mayor tamaño y coexisten con cristales de pirita euhedral, estos parámetros representan un ambiente disódico bajo, es decir, el fondo marino es levemente oxigenado. Si el rango de tamaño de los framboides es amplio, los cristales euhedrales de pirita son más abundantes que los framboides y solo una pequeña fracción tiene un

diámetro menor a 5 μm , representa un ambiente disódico alto, donde existe una restricción parcial de oxígeno en las aguas de fondo. El último estado, se trata de un ambiente óxico (sin restricción de oxígeno en la columna de agua del fondo marino) y se caracteriza por la ausencia de framboides; sin embargo, los cristales euhedrales de pirita pueden encontrarse en bajas cantidades (Zhou y Jiang, 2009; Bond y Wignall, 2010; Huang *et al.*, 2017). Los estados redox de las muestras se representan en un diagrama propuesto por Wilkin *et al.* (1996), modificado posteriormente por Bond y Wignall (2010) y Tian *et al.* (2014). En este diagrama se grafica el diámetro promedio de los framboides frente a la desviación estándar. La línea que divide los ambientes anódicos de los disódicos se determina utilizando una ecuación propuesta por Tian *et al.* (2014), la cual es $M = -3.3 \times DS + 14$, donde M representa el valor promedio y DS la desviación estándar de las distribuciones de los framboides.

Resultados

- Análisis de facies sedimentarias

El perfil estudiado (Figura 2) tiene un espesor de 20 metros, constituido principalmente por sedimentos finos con cuerpos de arenas subordinados hacia la parte superior. Está integrado por 4 facies, ellas son:

Facies 1: constituida por pelitas negras masivas. En ella se encontraron abundantes restos de trilobites, tanto fragmentos como ejemplares completos. Se caracteriza como una sucesión de capas de pelitas negras masivas, sin laminación ni fisilidad visibles en muestra de mano. A partir del estudio microscópico se determinó que está compuesta por láminas de espesor variable entre 0.5 y 1 mm, paralelas y con gradación interna; Las láminas presentan en su base zonas difusas de colores claros que van gradando hacia la parte superior a zonas más oscuras (Figura 3 a). Las regiones oscuras tienen un espesor que varía entre 0,5 a 1 mm y están compuestas por muscovita, arcillas, minerales opacos y materia orgánica. Las zonas cla-

ras son las más finas con espesores menores a 0,04 mm y no están bien definidas, compuestas principalmente por granos de cuarzo, con muscovita y arcillas en menor proporción. Distribuidos de manera dispersa en toda la muestra se observan minerales opacos de sección circular y algunos euhedrales que mediante el uso de iluminación episcópica fueron reconocidos como cristales de pirita con estructura framboidal y cristales euhedrales (Figura 3 b).

Facies 2: pelitas gris oscuras con laminación fina paralela. En muestras de mano es posible distinguir una laminación plana paralela muy fina, que consta de cuplas de láminas oscuras y claras. Microscópicamente esta estructura sedimentaria se mantiene (Figura 3 c) y se observa que las láminas oscuras de entre 0,1 a 1,2 mm de espesor, están constituidas principalmente por arcillas, muscovita y pequeñas laminillas de materia orgánica. Las láminas claras están compuestas principalmente por granos de cuarzo, de granulometría de tamaño limo y calcita. También se encuentran minerales opacos distribuidos por toda la muestra, con mayor abundancia en las capas oscuras. Se reconocieron restos fósiles tanto en el afloramiento como al microscopio, en el último caso se observó que el cuerpo fósil se encuentra relleno de minerales opacos identificados como pirita con estructura framboidal (Figura 3 d).

Facies 3: pelitas de tonalidad gris oscura-verdosa con delgados niveles de limo. Esta facies se intercala con la facies 2 en la parte media - alta del perfil. Está compuesta por paquetes de pelitas gris oscuras - verdosas con capas de limo que tienen continuidad lateral y espesores variables entre 2 mm y 6 cm. Los primeros niveles limosos están formados por ondulitas simétricas, paralelas y de 2 mm de espesor. A medida que se avanza hacia la parte media-alta del perfil, se observa que el espesor de las capas de limo aumenta hasta 6 cm y presentan una estratificación heterolítica con laminación ondulítica y tipo HCS ("*hummocky cross - stratification*") con bases erosivas onduladas. Los niveles de limo están separados por paquetes de pelitas de

Formación Lampazar (Quebrada Azul, Sierra de Cajas).

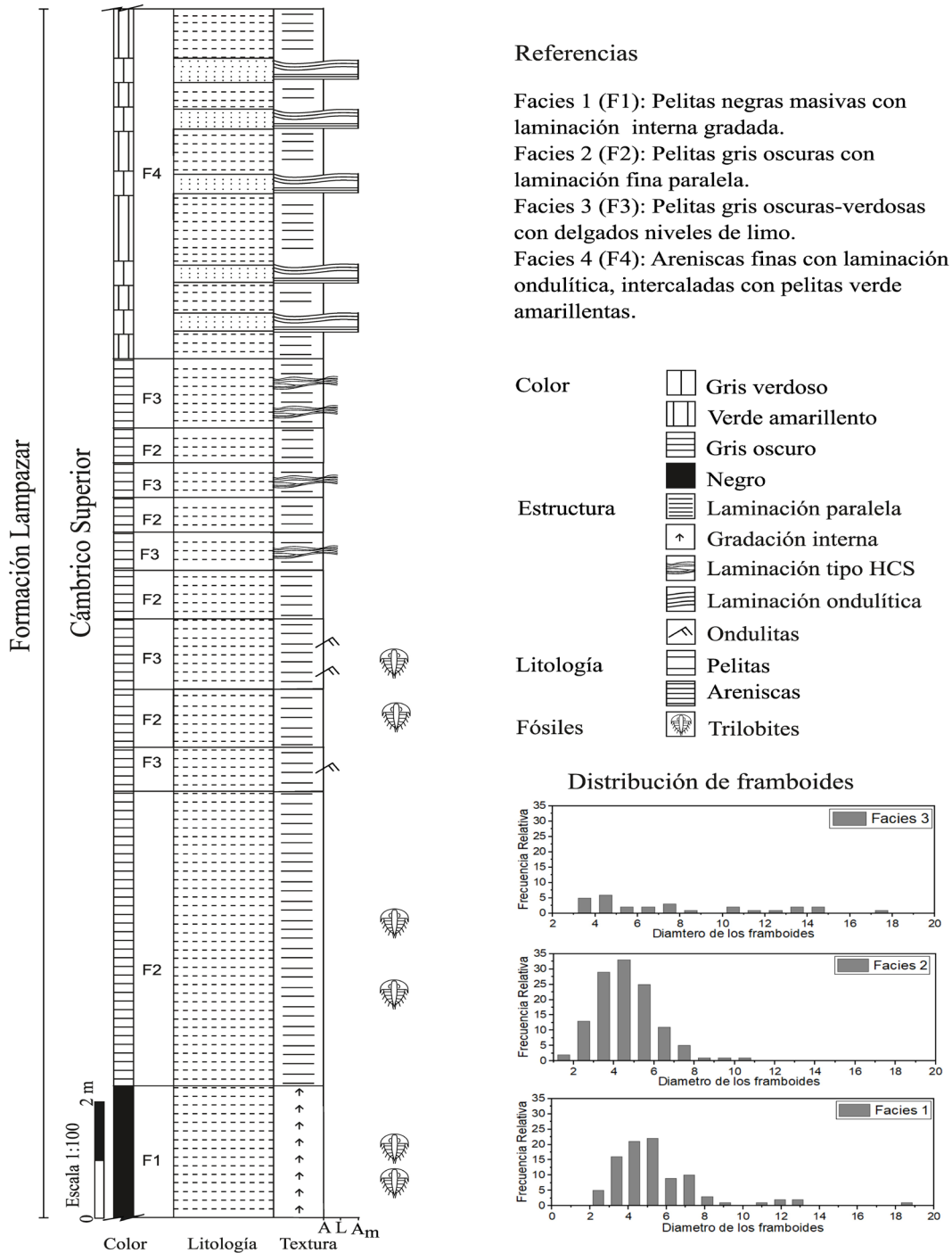


Figura 2. Perfil estratigráfico de la Formación Lampazar (Quebrada Azul, sierra de Cajas). Se observa la relación entre las facies finas y la distribución de framboides. / **Figure 2.** Stratigraphic profile of the Lampazar Formation (Quebrada Azul, Sierra de Cajas). The relationship between the fine facies and the distribution of framboides is observed.

espesores entre 10 y 50 cm. Al observar las pelitas bajo el microscopio petrográfico, se pudo apreciar que la laminación no es paralela (Figura 3 e). Está compuesta por láminas claras limosas que contienen principalmente cuarzo, así como

también minerales del grupo de las micas, como muscovita y biotita, junto con clorita y minerales opacos en baja proporción (Figura 3 f). Los granos de cuarzo son los de mayor tamaño, con dimensiones que oscilan entre 0.005 y 0.04 mm.

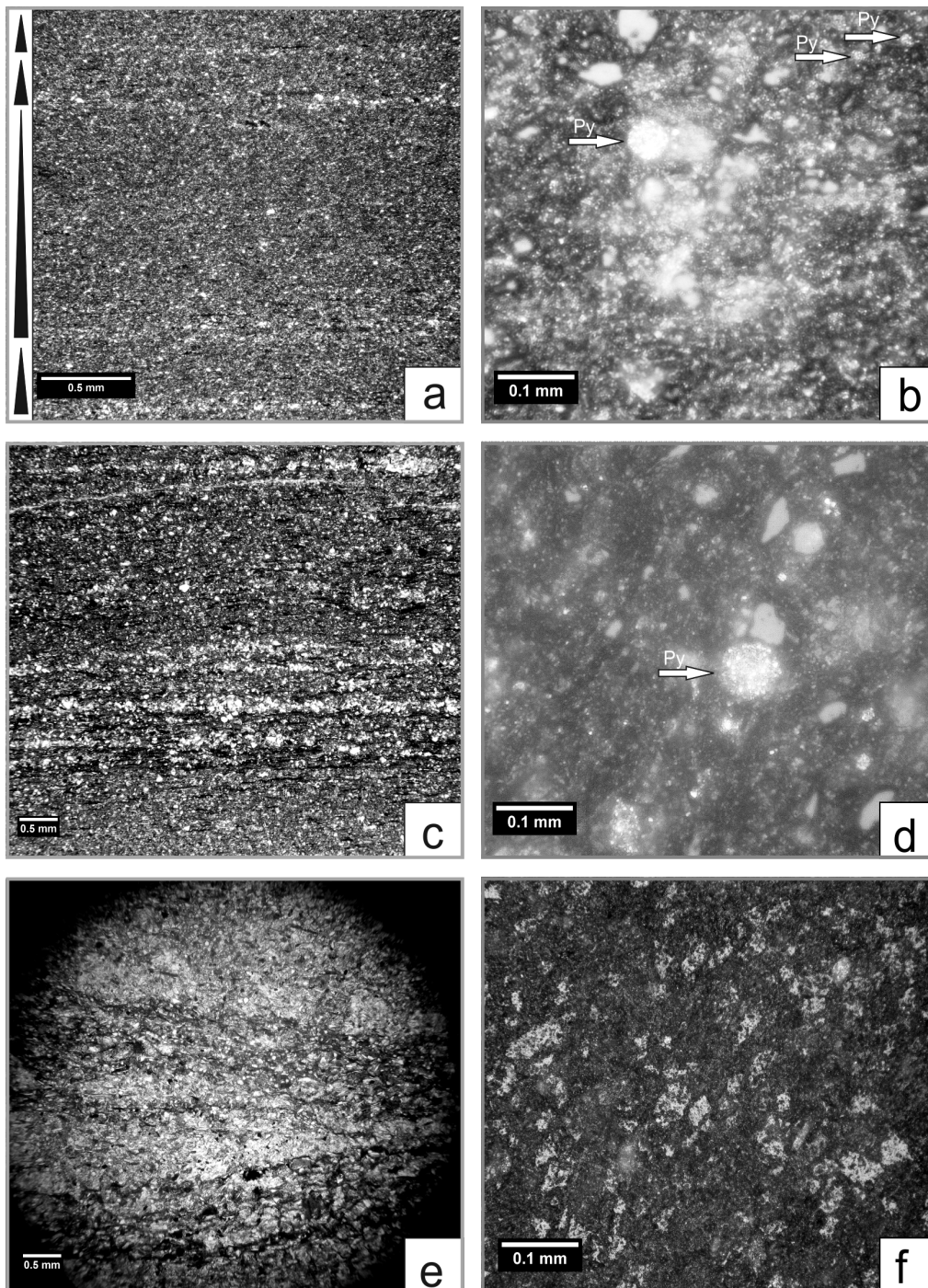


Figura 3. Petrografía de las facies finas donde se observa la mineralogía. **a, c y e,** Imágenes analizadas con iluminación diascópica con un aumento de 4X. **a-** Las flechas negras marcan las láminas con estructura gradada de la facies 1. **c-** Se observa la laminación paralela y fina que caracteriza la facies 2. **e-** acuñaamiento de las láminas producto de la acción de tormentas. **b, d y f,** Imágenes analizadas con iluminación episcópica con un aumento de 40X de las facies 1, 2 y 3 respectivamente, donde se observa que los minerales opacos presentes están compuestos por pirita con estructura framboidal. Nótese la menor cantidad de framboides en la facies 3. Las flechas blancas señalan estructuras framboidales de pirita (Py=Pirita). / **Figure 3.** Petrography of the thin facies showing the mineralogy. **a, c and e,** Images analyzed with diascopic illumination at 4X magnification. **a-** Black arrows mark the lamellae with graded structure of facies 1. **c-** The thin parallel lamination that characterizes facies 2 can be seen. **e-** wedging of the lamellae due to the action of storms. **b, d and f,** Images analyzed with episcopic illumination at 40X magnification of facies 1, 2 and 3 respectively, where it is observed that the opaque minerals present are composed of pyrite with framboidal structure. Note the lower amount of framboids in facies 3. The white arrows point to pyrite framboidal structures (Py=Pyrite).

En contraste, las láminas oscuras contienen abundante biotita, muscovita, arcilla y minerales opacos, así como laminillas de materia orgánica.

Facies 4: Areniscas finas con laminación paralela a ondulítica, intercaladas con pelitas verde-amarillentas. Esta facies está compuesta por capas interestratificadas de areniscas finas de color verde - amarillento con espesores que varían entre 2 y 7 cm y capas de pelitas gris-verdosas muy alteradas con espesores que varían entre 2 y 6 cm. El paso entre la facies 3 y la facies 4 se puede observar por un marcado cambio en el color de las pelitas. Las capas de areniscas presentan una geometría tabular y sus contactos son netos, plano en la base y ondulado en el techo. Internamente presentan una laminación plano - paralela en la base y pasa hacia la parte superior a una laminación ondulítica unidireccional de pequeña escala.

- Framboides de Pirita

Del estudio estadístico de los framboides de pirita de las facies oscuras de la Formación Lampazar se obtuvieron los siguientes resultados:

En la Facies 1 los framboides son abundantes, se encuentran diseminados mayormente como framboides individuales (Figura 4 a) y en menor proporción como clústeres y cristales euhedrales. A partir de la medición de 94 framboides, se determinó que el diámetro promedio es de 5,47 μm , con una desviación estándar de 2,52 μm y un diámetro máximo de 18,19 μm . En base en la clasificación de Bond y Wignall (2010) y teniendo en cuenta que presenta una laminación paralela gradada, se considera a la facies 1 como depositada en un ambiente mayormente anóxico.

La Facies 2 presenta mayor abundancia de framboides. En general los framboides se encuentran tanto de forma individual como en clústers. También se han observado masas de microcristales diseminados y algunos cristales euhedrales (Figura 4 b). En este caso se midieron 122 ejemplares, dando como resultado un diámetro promedio de 4,61 μm , una desviación estándar de 1,58 μm y un diámetro máximo de

10,84 μm . El ambiente redox dominante durante la sedimentación de la facies 2, según los parámetros utilizados por Bond y Wignall (2010), quedaría definido como mayormente euxínico.

Por último, en la Facies 3 los framboides son escasos y los cristales euhedrales constituyen el mayor porcentaje de pirita (Figura 4 c). El diámetro promedio de los framboides es 7,71 μm , con una desviación estándar de 4,15 μm y un diámetro máximo de 17,78 μm . Los datos obtenidos en esta facies surgen a partir del análisis de 29 framboides, lo que indica que las condiciones durante su formación no favorecían su desarrollo. El ambiente redox definido para esta facies es el de un ambiente mayormente disódico bajo, es decir un ambiente débilmente oxigenado. Las condiciones redox determinadas para las tres facies coinciden con la clasificación según los parámetros de diámetro promedio versus la desviación estándar de la distribución propuesta por Tian *et al.* (2014) (Figura 4 d).

Discusión

La facies 1 se compone principalmente de sedimentos finos, con un bajo porcentaje de limo y arena, lo que hace que su observación a simple vista sea difícil. Sin embargo, al observarla con un microscopio, se puede apreciar una estructura que consiste en láminas finas (>1mm según la clasificación de O'Brien, 1990) paralelas con gradación interna. Esta estructura es similar a las descritas en pelitas negras por Wignall (1994), O'Brien (1996) y Wang *et al.* (2023), quienes indican que es el resultado de la acción de corrientes turbidíticas de fondo de baja densidad.

La estructura sedimentaria que caracteriza a la Facies 2, compuesta por una laminación fina con espesor menor a 1 mm, puede ser atribuida al menos a tres procesos diferentes de acuerdo con lo propuesto por O'Brien (1996): 1) decantación por suspensión. 2) flujos de turbidez estratificados y 3) aporte eólico de nubes de polvo con posterior decantación por suspensión. Para el caso de la Formación Lampazar, teniendo en cuenta la relación de la Facies 2 con las otras fa-

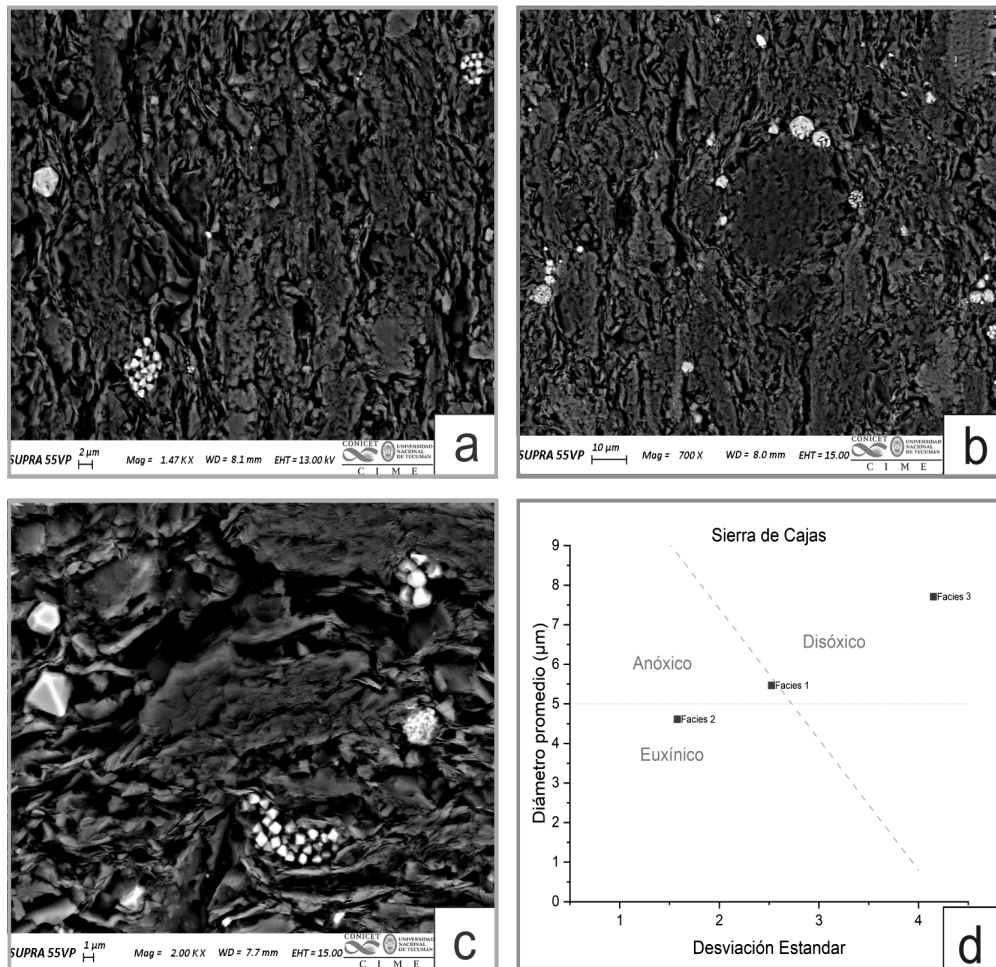


Figura 4. Resultados del análisis de los framboides. **a, b y c,** Imágenes obtenidas con microscopía electrónica de barrido, de framboides, agregados y cristales euhedrales, de las facies 1, 2 y 3 respectivamente. Se observa que la facies 1 presenta framboides pequeños y cristales euhedrales de pirita de tamaños similares. La facies 2 presenta framboides pequeños y abundantes mientras que los cristales euhedrales están presentes en bajas proporciones. La facies 3 es la que mayor proporción de cristales euhedrales presenta como se observa en la imagen **c. d,** Diagrama de clasificación de ambientes redox según Tian *et al.* (2014) donde quedan bien diferenciados las condiciones redox de cada facies. / **Figure 4.** Results of the analysis of the framboids. **a, b and c,** Images obtained with scanning electron microscopy, of framboids, aggregates and euhedral crystals of facies 1, 2 and 3 respectively. Facies 1 shows small framboids and euhedral pyrite crystals of similar sizes. Facies 2 has small and abundant framboids while euhedral crystals are present in low proportions. Facies 3 has the highest proportion of euhedral crystals as shown in image **c. d,** Diagram of redox environment classification according to Tian *et al.* (2014) where the redox conditions of each facies are clearly differentiated.

cies descritas y su posición dentro del perfil estudiado, la misma puede ser interpretada como formada por un proceso de decantación por suspensión. Este proceso habría sido continuo durante todo el depósito de las pelitas negras de esta unidad e interrumpido esporádicamente por corrientes de fondo que generaban las facies de mayor energía presentes en el perfil estudiado.

La facies 3 muestra evidencias claras de la acción de tormentas y corrientes de fondo. En esta facies se puede observar que la energía del

ambiente aumenta gradualmente hacia la parte superior del perfil. En la parte media, se pueden observar ondulitas de limo, las cuales probablemente fueron producidas por la acción de corrientes de fondo de baja energía. A medida que se avanza hacia la parte media superior del perfil, el aporte de limo es mayor y la presencia de estructuras tipo HCS indica la acción de tormentas. Estos niveles de limo presentan espesores de hasta 6 cm dentro de una sucesión dominada por pelitas gris oscuras, lo cual sugiere que la facies 3

se depositó en un ambiente de plataforma externa en transición a una interna afectada principalmente por eventos de tormenta.

Los valores obtenidos a partir del análisis de los framboides indican que en las facies 1 y 2 predominaban ambientes con deficiencia de oxígeno, anóxico en el caso de la facies 1 y euxínico en el caso de la facies 2. En cuanto a la facies 3, donde la fracción limosa es mayor y los framboides son poco frecuentes, estarían indicando, según la clasificación de Bond y Wignall (2010), un ambiente disódico inferior donde las condiciones del fondo marino son débilmente oxigenadas.

La presencia de una importante fauna bentónica, compuesta principalmente por trilobites, llevó a Tortello y Esteban (2003) a estudiar detalladamente dicha fauna e infirieron que estaba adaptada a vivir bajo condiciones de poco oxígeno. Por otra parte, la buena preservación de la laminación original, según estos autores, indicaría la ausencia de organismos bioturbadores por debajo de la interfaz agua-sedimento debido a condiciones anóxicas del medio. Si tenemos en cuenta que 1 cm de roca analizada representa cientos de años de sedimentación (Wignall *et al.*, 2010), los resultados obtenidos representan el promedio de los ambientes redox que actuaron durante este período. Por lo tanto, se sugiere que, las condiciones euxínicas determinadas no eran permanentes durante la sedimentación, sino que, corrientes ocasionales podrían haber aportado el oxígeno suficiente al fondo marino como para permitir la presencia de trilobites. Un caso similar ha sido descrito por Zhou y Jiang (2009) quienes determinaron condiciones euxínicas en depósitos del Cámbrico inferior de China donde se encontraron restos de esponjas. Esto también explicaría la presencia de framboides atípicos de gran tamaño en las facies 1 y 2.

- Interpretación paleoambiental

El paleoambiente de la Formación Lampazar es interpretado teniendo en cuenta la litología, color, contenido fósil y las estructuras sedimentarias presentes en cada facies determinada en el perfil relevado, como así también usando

los datos provistos por el análisis de los framboides de piratas. Este ambiente es asignable a una plataforma externa en condiciones de baja oxigenación que pasa transicionalmente a un ambiente más somero próximo al nivel de base de olas de tormenta con condiciones más oxigenadas.

La facies 2 se encuentra presente a lo largo de todo el perfil estudiado, intercalándose con las otras facies: en la parte inferior con la facies 1, en la parte media - superior con la facies 3 y en la parte superior es reemplazada por la facies 4. Por lo tanto, se considera que la facies 2 representa la sedimentación de base de los sedimentos finos de la Formación Lampazar. El proceso predominante a lo largo del perfil estudiado es la sedimentación por decantación de sedimentos finos, donde los componentes arcillosos de morfología planar se depositan paralelamente a la superficie del fondo marino, mientras que los componentes limosos, principalmente granos de cuarzo con formas equantes, se depositan en finas láminas. A través del análisis de los framboides de pirita presentes en la facies 2, se determinó que la decantación se produjo en un ambiente euxínico.

La sedimentación de base era interrumpida por flujos de fondo esporádicos, los cuales presentan un aumento de energía de transporte hacia la parte superior del perfil, dando lugar a las estructuras características de las facies 1, 3 y 4, lo que estaría relacionado con una disminución de la profundidad del fondo marino.

La facies 1, presente en la parte inferior del perfil, caracterizada por una sucesión de pelitas negras masivas e internamente compuesta por láminas con estructura gradada, es la de menor energía siendo atribuida a la acción de flujos turbidíticos de baja densidad que llegaban a la zona distal de la plataforma marina durante episodios de tempestad. Estos eventos no eran suficientemente fuertes como para oxigenar el fondo marino, sin embargo, las condiciones redox pasaron de ser euxínicas a anóxicas.

En regiones más someras la energía de los flujos de fondo aumentaba, lo cual permitía el transporte de sedimento de granulometría mayor

como los de las facies 3 y 4. En la facies 3, en el tramo medio y medio-superior del perfil, aparecen estructuras relacionadas tanto a corrientes como olas típicas de episodios de tormentas desarrolladas en sedimentos compuestos por limo fino a grueso y arcillas. Estos eventos de tormentas oxigenaban momentáneamente el fondo marino, por lo que la materia orgánica en esta facies tiene menor conservación y las condiciones redox eran predominantemente disóxicas.

Los episodios de oxigenación de fondo se hicieron más frecuentes en la parte superior del perfil, lo que generó un fondo marino oxigenado de forma permanente. Esto queda evidenciado por el cambio de color que puede observarse entre las pelitas de la facies 3 y la facies 4, que pasan de un color gris oscuro a uno verdoso. Simultáneamente al aumentar la energía de los flujos, el tamaño de los sedimentos transportados cambia de limoso a depósitos predominantemente arenosos que generaron las capas con laminación característica de la facies 4.

La energía de transporte está directamente relacionada con la distancia recorrida por el flujo de fondo, por lo que la facies 4 representaría a los depósitos en las zonas más proximales de la plataforma marina donde la energía del flujo era mayor, mientras que la facies 1 representaría los depósitos relacionados a la pérdida de energía del mismo flujo en las regiones más distales de la plataforma marina. Estos flujos serían los responsables de la proliferación de trilobites en ambientes mayormente euxínicos y anóxicos, al aportar oxígeno disuelto al fondo marino.

Conclusiones

Teniendo en cuenta el estudio sedimentológico, se concluye que la Formación Lampazar se originó en un ambiente de plataforma distal profunda, donde los sedimentos finos eran transportados por corrientes de turbidez diluidas. Posteriormente, hubo una transición hacia un ambiente de plataforma proximal, donde las tormentas generaban el aporte de sedimento y modelaban el fondo marino.

Aunque previamente otros autores han su-

gerido que las pelitas negras y grises de la Formación Lampazar en la sierra de Cajas se depositaron en un ambiente anóxico durante el Cámbrico superior, la presencia de framboides de pirita indica que predominaban las condiciones euxínicas en el fondo marino (facies 2). Estas condiciones se veían interrumpidas por corrientes de fondo diluidas y eventos de tormentas (facies 1 y 3), que permitían el ingreso esporádico de oxígeno a la plataforma generando condiciones disóxicas. El aporte de oxígeno generaba condiciones favorables para el desarrollo de trilobites, los cuales estaban adaptados a vivir en ambientes con escaso oxígeno. En la parte superior de la Formación Lampazar (facies 4), estos eventos se hicieron más frecuentes, lo que indica una somerización de la plataforma marina.

Los framboides de pirita son indicadores útiles de las condiciones redox en el fondo marino durante la sedimentación. Su aplicación en estudios sedimentológicos puede proporcionar información valiosa sobre la evolución de las condiciones ambientales a lo largo del tiempo geológico.

Agradecimientos

Este trabajo fue posible gracias a los fondos del proyecto PIUNT G - 719 dirigido por la Dra. Susana Beatriz Esteban, otorgado por la Secretaría de Ciencias, Arte e Innovación Tecnológica de la Universidad Nacional de Tucumán y por la beca de investigación CIUNT del año 2015 resolución N°899 - 09 otorgada al Geol. Enzo R. Marcial. Se agradece al Centro Integral de Microscopía Electrónica (CIME - UNT - CONICET), en donde fueron muy amables y estuvieron dispuestos a ayudarnos, especialmente al Lic. Luciano Martínez. Al Instituto Superior de Correlación Geológica (INSUGEO - UNT - CONICET) por facilitarnos los instrumentos necesarios. A la Compañía Minera Aguilar S.A., por brindarnos hospedaje durante el trabajo de campo realizado. En especial agradecer a Daniel Balverde, Agostina Forani y Gabriel Alarcón por su importante ayuda. Y, por último, al Dr. Miguel A. Báez por su colaboración en la recolección de muestras.

Referencias

- Aceñolaza, F. G. 1966. Contribución al conocimiento geológico y paleontológico de la región del Espinazo del Diablo, departamento Humahuaca, provincia de Jujuy. Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Córdoba, 148 pp.
- Aceñolaza, F.G. 1968. Geología estratigráfica de la región de la sierra de Cajas, Dpto. Humahuaca (Provincia de Jujuy). *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 23: 207 – 222.
- Aceñolaza, G.F. y Nieva, S. 2001. Sobre algunas acumulaciones fosilíferas en el Ordovícico Inferior de la Cordillera Oriental Argentina. *Boletín Geológico y Minero*, 112(4): 35 – 42.
- Blood, D. R. y Lash, G. G. 2015. Dynamic Redox conditions in the Marcellus Shale as recorded by pyrite framboid size distributions. *Special Paper of the Geological Society of America*, 515: 153 – 168.
- Bond, D. P. G. y Wignall, P. B. 2010. Pyrite framboid study of marine Permian-Triassic boundary sections: A complex anoxic event and its relationship to contemporaneous mass extinction. *Bulletin of the Geological Society of America*, 122(7 – 8): 1265 – 1279.
- Buatois, L. A. y Mángano, M. G. 2003. Sedimentary facies, depositional evolution of the Upper Cambrian - Lower Ordovician Santa Rosita formation in northwest Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, 16: 343 – 363.
- Buatois, L. A., Moya, M. C., Mángano, M. G., Malanca, S. y Ortega, G. 2003. Paleoenvironmental and sequence stratigraphic framework of the Cambrian – Ordovician transition in the Angosto del Moreno Area, Northwest Argentina. *Serie Correlación Geológica*, 17: 397 – 401
- Canfield, D. y Raiswell, R. 1991. Pyrite formation and pyrite preservation. In: P.A. Allison and D.E.G. Briggs (Eds.), *Taphonomy: Releasing the Data Locked in the Fossil Record*. Plenum Press, New York, 9: 337 – 387.
- Canfield, D.E., Raiswell, R., Westrich, J.T., Reaves, C.M. y Berner, R.A. 1986. The use of chromium reduction in the analysis of reduced inorganic sulfur in sediments and shales. *Chemical Geology*, 54: 149 – 155.
- Esteban, S.B. y Tortello, M.F. 2007. Latest Cambrian sedimentary settings and trilobite faunas from the western Cordillera Oriental, Argentina. *Memoirs of the Association of Australasian Palaeontologists*, 34: 431 - 460.
- Harrington, H.J. 1937. On some Ordovician fossils from northern Argentina. *Geological Magazine*, 74: 97 - 124.
- Harrington, H. J. 1957. *Ordovician formations of Argentina*. En: Harrington, H. J. y Leanza, A. F., (Eds) *Ordovician trilobites of Argentina*. Department of Geology, University of Kansas, Special Publication, 1: 1 - 39.
- Huang, Y., Chen, Z. Q., Wignall, P. B. y Zhao, L. 2017. Latest Permian to Middle Triassic redox condition variations in ramp settings, South China: Pyrite framboid evidence. *Bulletin of the Geological Society of America*, 129(1 – 2): 229 – 243.
- Keidel, J. 1943. El Ordovícico inferior en los Andes del norte argentino y sus depósitos marino - glaciales. *Academia Nacional de Ciencias, Boletín* 36: 140 - 229.
- Lyons, T.W. y Severmann, S. 2006. A critical look at iron paleoredox proxies: new insights from modern euxinic marine basins. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70: 5698–5722.
- Meyer, K.M. y Kump, L.R. 2008. Oceanic euxinia in earth history causes and consequences. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 36: 251 – 88.
- Moya, M. C., Malanca, S., Monteros, J. A., Albanesi, G. L., Ortega, G., Buatois, L. A., 2003. Late Cambrian – Tremadocian faunas and events from Angosto del Moreno Section. Eastern Cordillera, Argentina. *Serie Correlación Geológica*, 17:1 - 6.
- O'Brien, N. R. 1990. Significance of lamination in Toarcian (lower Jurassic) shales from Yorkshire, Great Britain. *Sedimentary Geology*, 67(1-2): 25-34.
- O'Brien, N.R. 1996. Shale lamination and sedimentary processes. En: Kemp A.E.S. (Ed.) *Palaoclimatology and Palaeoceanography from Laminated Sediments*. Geology Society Special publication, 116: 23-36.
- Rust, G. W. 1935. Colloidal Primary Copper Ores at Cornwall Mines, Southeastern Missouri. *The Journal of Geology*, 43(4): 398 - 426.
- Sánchez, M.C. y Salfity, J.A. 1994. Las relaciones estratigráficas del Grupo Mesón (Cámbrico) en la Cordillera Oriental argentina. *VII Congreso Geológico Chileno (Chile)*, Actas, 1: 528 - 532.
- Sánchez, M. C. y Salfity, J. A. 1999. La cuenca cámbrica del Grupo Mesón en el Noroeste Argentino: desarrollo estratigráfico y paleogeográfico. *Acta geológica hispanica*, 123 - 139.
- Sassano, G. P. y Schrijver, K. 1989. Framboidal pyrite: early-diagenetic, late-diagenetic, and hydrothermal occurrences from the Acton Vale quarry, Cambro- Ordovician, Quebec. *American Journal of Science*, 289(2): 167 - 179.
- Sawlowicz, Z. 2000. Framboids: From their origin to application. *Mineralogical Transactions*, 88: 0 - 80.
- Schallreuter, R. 1984. *Framboidal pyrite in deep-sea sediments*. *Initial reports of the deep - sea drilling project*, 75: 875 - 891.
- Shen, W., Lin, Y., Xu, L., Li, J., Wu, Y. y Sun, Y. 2007. Pyrite framboids in the Permian-Triassic boundary section at Meishan, China: Evidence for dysoxic deposition. *Palaeogeography, Palaeoclimatology,*

- Palaeoecology*, 253(3 – 4): 323 – 331.
- Skei, J. M. 1988. Formation of framboidal iron sulfide in the water of a permanently anoxic fjord - Framvaren, south Norway. *Marine Chemistry*, 23: 345-352.
- Suits N.S. y Wilkin R.T. 1998. Pyrite formation in the water column and sediments of a meromictic lake. *Geology*, 26: 1099 - 1102.
- Tian, L., Tong, J., Algeo, T.J., Song, H., Song, H., Chu, D., Shi, L. y Bottjer, D.J. 2014. Reconstruction of Early Triassic ocean redox conditions based on framboidal pyrite from the Nanpanjiang Basin, South China. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 412: 68 - 79.
- Tortello M.F. y Esteban, S.B. 2003. Trilobites del Cámbrico Tardío de la Formación Lampazar (sierra de Cajas, Jujuy, Argentina). Implicancias bioestratigráficas y paleoambientales. *Ameghiniana*, 40 (3): 323 - 344.
- Tortello, M.F. y Esteban, S. B. 2007. Trilobites de la Formación Volcancito (Miembro Filo Azul, Cámbrico Tardío) del Sistema de Famatina, La Rioja, Argentina: aspectos sistemáticos y paleoambientales. *Ameghiniana*, 44(3): 597 - 620.
- Tortello, M. F., Rábano, I., Rao, R. I. y Aceñolaza, F. G. 1999. Los trilobites de la transición Cámbrico - Ordovícico en la quebrada Amarilla. *Boletín Geológico y Minero*, 110(5): 555 - 572.
- Turner, J.C.M. 1958. Estratigrafía del Cordón de Escaya y de la sierra de Rinconada (Jujuy). *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 13(1 - 2): 15 - 41.
- Turner, J.C.M. 1960. Estratigrafía de la sierra de Santa Victoria, Provincia de Salta y Jujuy. *Academia Nacional de Ciencias de Córdoba*, 41 (2): 165 - 196.
- Turner, J.C.M. 1964. Descripción geológica de la hoja 2c, Santa Victoria. *Boletín Instituto Nacional de Geología y Minería*, 104: 99p.
- Wang H., Shi Z., Sun S., Zhao Q., Zhou T., Cheng F., Bai W. 2023. Microfacies types and distribution of epicontinental shale: A case study of the Wufeng-Longmaxi shale in southern Sichuan Basin, China. *Petroleum Exploration and Development*, 50(1), 57 - 71.
- Wang, L., Shi, X. y Jiang, G. 2012. Pyrite morphology and redox fluctuations recorded in the Ediacaran Doushantuo Formation. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 333 – 334: 218 – 227.
- Wei, H., Algeo, T. J., Yu, H., Wang, J., Guo, C. y Shi, G. 2015. Episodic euxinia in the Changhsingian (late Permian) of South China: Evidence from framboidal pyrite and geochemical data. *Sedimentary Geology*, 319: 78 – 97.
- Wignall, P. B. 1994. *Black shales*. Clarendon Press, Oxford pp. 1 - 127.
- Wignall, P. B., Bond, D. P. G., Kuwahara, K., Kakuwa, Y., Newton, R. J. y Poulton, S. W. 2010. An 80 million year oceanic redox history from Permian to Jurassic pelagic sediments of the Mino-Tamba terrane, SW Japan, and the origin of four mass extinctions. *Global and Planetary Change*, 71(1 – 2): 109 – 123.
- Wignall P.B. y Newton R. 1998. Pyrite framboid diameter as a measure of oxygen deficiency in ancient mudrocks. *American Journal of Science*, 298: 537-552.
- Wignall, P. B., Newton, R. y Brookfield, M. E. 2005. Pyrite framboid evidence for oxygen-poor deposition during the Permian-Triassic crisis in Kashmir. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 216(3 – 4): 183 – 188.
- Wilkin, R. T. y Arthur, M. A. 2001. Variations in pyrite texture, sulfur isotope composition, and iron systematics in the Black Sea: Evidence for Late Pleistocene to Holocene excursions of the O 2-H 2 S redox transition. *Geochimica et Cosmochimica*, 65 (9): 1399 – 1416.
- Wilkin, R. T., Arthur, M. A. y Dean, W. E. 1997. History of water - column anoxia in the Black Sea indicated by pyrite framboid size distributions. *Earth and Planetary Science Letters*, 148: 517 - 525.
- Wilkin, R. T. y Barnes, H. L., 1997. Formation processes of framboidal pyrite. *Geochimica et Cosmochimica*, 61(2): 323 - 339.
- Wilkin R.T., Barnes H.L. y Brantley S, L. 1996. The size distribution of framboidal pyrite: an indicator of redox conditions. *Geochimica et Cosmochimica*, 60: 3897 - 3912.
- Yang, R., He, S., Wang, X., Hu, Q., Hu, D. y Yi, J. 2016. Paleo - ocean redox environments of the Upper Ordovician Wufeng and the first member in lower Silurian Longmaxi formations in the Jiaoshiha area, Sichuan Basin. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 53(4): 426 – 440.
- Zhou, C. y Jiang, S. Y. 2009. Palaeoceanographic redox environments for the lower Cambrian Hetang Formation in South China: Evidence from pyrite framboids, redox sensitive trace elements, and sponge biota occurrence. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 271(3 – 4): 279 – 286.

Recibido : 06 de octubre de 2022

Aceptado : 01 de mayo de 2023