

Análisis Facial y Paleoambiental de la Formación Coquena (Tremadociano superior) en la Región de Purmamarca, Cordillera Oriental Jujeña

María del Huerto BENÍTEZ¹

Resumen: ANÁLISIS FACIAL Y PALEOAMBIENTAL DE LA FORMACIÓN COQUENA (TREMADOCLANO SUPERIOR) EN LA REGIÓN DE PURMAMARCA, CORDILLERA ORIENTAL JUJEÑA. En la quebrada de Chalala, región de Purmamarca, aflora una sucesión heterolítica predominantemente arenosa que ha sido asignada a la Formación Coquena (Tremadociano superior). La sección presenta un espesor de 350 m, su base se encuentra cubierta, mientras que su techo se dispone discordantemente sedimentos cuaternarios. En este perfil se reconocieron 5 facies sedimentarias correspondientes a sedimentos tamaño arena, que presentan estructuras generadas por olas y corrientes, con escaso material pelítico intercalado. Los niveles psamíticos están compuestos por areniscas muy finas a finas, gris verdosas, muy coherentes, de geometría tabular o lenticular que se caracterizan por poseer niveles bioclásticos. El material de granulometría más fina, presente principalmente en los tramos inferiores a medio del perfil, corresponden a lutitas y limolitas arenosas verdosas, friables, muy alteradas.

El estudio de estas facies ha permitido identificar distintos subambientes dentro de la plataforma, desde cara de playa intermedia (*shoreface*) a plataforma externa (*offshore*), en donde el material arenoso fue transportado y retrabajado por numerosos eventos episódicos. Las características de las facies sedimentarias y la existencia de información bioestratigráfica permiten realizar inferencias sobre la dinámica sedimentaria de la plataforma ordovícica y establecer correlaciones con otras localidades de la Cordillera Oriental.

Abstract: FACIAL AND PALEOENVIRONMENT STUDY OF THE COQUENA FORMATION (UPPER TREMADOCLAN) AT THE PURMAMARCA REGION, CORDILLERA ORIENTAL OF JUJUY. The upper Tremadocian Coquena Formation at the Chalala Creek (Purmamarca, northwestern Argentina) is a heterolithic dominantly sandy sequence. A 350 m thick section was relevelled, its base is not exposed, while its top is unconformably covered by modern sediments. The succession is represented by five sedimentary facies, which are dominated by sand sediments, showing wave-and current-structures, and subordinate shaly levels. The psamitic levels are composed of very fine to fine, greenish gray, very consistent sandstones. The geometry of these beds is tabular or lenticular characterized by having abundant bioclastic horizons. The finest material, present primarily in the lower to middle part of the profile, corresponds to greenish shales and sandy siltstones, highly altered. The study of these facies reflect different subenvironments of platform affected by storms, from middle shoreface to offshore, where the sandy material was transported and re-worked by numerous episodic events. The description and interpretation of these sedimentary facies in association with the biostratigraphic information available, allowed us understanding the sedimentary dynamic of the Ordovician shelf and correlate the Chalala Creek with the others localities of the Eastern Cordillera.

Palabras clave: Facies. Paleoambiente. Formación Coquena. Tremadociano superior.

Key words: Facies. Paleoenvironment. Coquena Formation. Upper Tremadocian.

Introducción

Los depósitos del Ordovícico del noroeste argentino corresponden a diferentes unidades siliciclásticas y volcánicas con abundante fauna fósil (e.g., trilobites, graptolitos, braquiópodos, conodontes, moluscos) que afloran en las provincias geológicas de Puna,

¹ INSUGEO – Facultad de Ciencias Naturales e I.M.L., Universidad Nacional de Tucumán, Miguel Lillo 205, 4000 Tucumán. Email: gcohuertos@hotmail.com.

Cordillera Oriental y Sierras Subandinas. Las sucesiones más completas se encuentran en la Cordillera Oriental, mientras que en las dos provincias geológicas restantes tienen menor representación. Estas secuencias han sido objeto de numerosos estudios estratigráficos, sedimentológicos y paleontológicos desde comienzos del siglo pasado (Kobayashi, 1936, 1937; Harrington, 1938; Harrington y Leanza, 1957; Turner, 1960; Moya, 1988, 1999, 2002, 2008, Aceñolaza *et al.*, 1999, Astini, 2003, 2008; Mángano y Buatois, 2004).

Durante el Ordovícico una amplia plataforma se desarrolló sobre el margen occidental del supercontinente de Gondwana (Moya, 1999, 2002). Las secuencias marinas siliciclásticas depositadas en esta plataforma fueron estudiadas y definidas por Turner (1960) como el Grupo Santa Victoria, y su unidad basal, la Formación Santa Rosita es reconocida como la integradora de los niveles del Cámbrico Superior-Tremadociano dentro del ámbito de la Cordillera Oriental. No obstante, en la región de la Quebrada de Humahuaca, las variaciones de los caracteres litológicos observables en distintas secciones de la Formación Santa Rosita, y la escasa información sedimentológica, ha llevado a la generación de numerosas denominaciones nomenclaturales, complicando la correlación entre las diferentes secciones. A fin de comprender la compleja historia depositacional de la Formación Santa Rosita, en los últimos años varios estudiosos se han focalizado en los aspectos ambientales y sedimentológicos (Mángano *et al.*, 1996; Buatois y Mángano, 2003; Astini, 2003; Mángano *et al.*, 2005; Esteban y Tortello, 2007).

La Formación Coquena es otra unidad de la cuenca ordovícica del noroeste argentino y correspondería a la parte superior de la Formación Santa Rosita. En este trabajo se describen e interpretan las facies sedimentarias identificadas en la secuencia aflorante en la quebrada de Chalala, región de Purmamarca, siendo el objetivo principal de este estudio aportar información relevante sobre la estratigrafía y sedimentología de la Formación Coquena a fin de ampliar el conocimiento sobre la dinámica paleoambiental en la plataforma marina durante el Tremadociano superior.

Ubicación y marco geológico

La sección estudiada se ubica en la quebrada de Chalala, que constituye una de las quebradas tributarias de la quebrada de Purmamarca, y se encuentra 5 km al oeste de la localidad de Purmamarca en el departamento Tumbaya, provincia de Jujuy (figura 1).

Las rocas más antiguas de la región pertenecen al basamento proterozoico-cámbrico,

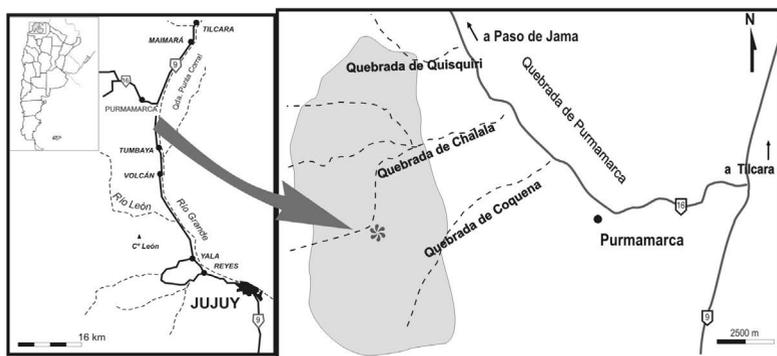


Figura 1. Mapa ubicación de la quebrada de Chalala, mostrando áreas con afloramientos ordovícicos (gris) y el área de estudio. / **Figure 1.** Ubication map of the Chalala creek, showing Ordovician outcrops (grey).

Formación Puncoviscana (Turner, 1960), la cual aflora en forma de escamas en la desembocadura de la quebrada de Chalala. En contacto tectónico sobre esta unidad se apoyan los niveles tremadocianos de la Formación Coquena que pasan transicionalmente a la Formación Cieneguillas, del Floiano (Harrington, 1957; *nom. transl.* Ramos *et al.*, 1967). Ambas unidades mencionadas se encuentran bien expuestas en ambos márgenes de la quebrada de Chalala. De manera aislada afloran los depósitos cretácico-terciarios del Grupo Salta en contacto tectónico con la Formación Puncoviscana y depósitos modernos.

Los niveles ordovícicos en esta región han sido reconocidos y estudiados por diversos autores desde el punto de vista geológico, sedimentológico y paleontológico, ya que los mismos son portadores de una rica asociación fósil representada principalmente por trilobites, palinomorfos, braquiópodos y conodontes (Harrington y Leanza, 1957; Ramos *et al.*, 1967; Amengual y Zanettini, 1974; Rao *et al.*, 1994; Tortello, 1996; Ottone *et al.*, 1995; Benedetto y Carrasco, 2002; Zeballo *et al.*, 2008). De dichos estudios cabe destacar el trabajo de Harrington (1957), quien describe originalmente los depósitos de la Formación Coquena en el área de estudio como una sucesión de areniscas grises verdosas con intercalaciones de limolitas fosilíferas, y en base a su fauna de trilobites (Biozona de *Notopeltis orthometopa*) dicho autor asigna a esta unidad al Tremadociano tardío. Posteriormente, Benedetto y Carrasco (2002) definen dos miembros en la Formación Coquena aflorante en la quebrada de Chalala, un miembro inferior heterolítico, correspondiente a un ambiente de cara de playa inferior, afectado por tormentas, y un miembro superior predominantemente pelítico, que indicaría la transición a la plataforma. Finalmente, Zeballo *et al.* (2008), en base a la fauna de conodontes y graptolites provenientes de los miembros inferior y superior de la unidad, registran la Zona de *Cordylodus angulatus*, *Paltodus deltifer* y *Acodus deltatus-Paroistodus protens*, y la Zona de *Aorograptus victoriae*, conjuntamente con restos de trilobites pertenecientes a la biozona *Notopeltis orthometopa*, permitiendo confirmar la edad de tremadociana tardía para la secuencia de la quebrada de Chalala.

Facies sedimentarias

El perfil relevado en la quebrada de Chalala está compuesto por una secuencia heterolítica con tramos predominantemente arenosos portadores de importantes depósitos bioclásticos conformados por braquiópodos y trilobites. Su base se encuentra cubierta por derrubios, mientras que sobre su techo se disponen discordantemente sedimentos modernos.

Dentro de la secuencia se han reconocido cinco facies sedimentarias definidas en base a su litología, contactos, geometría, estructuras sedimentarias y contenido fósil (figura 2): lutitas grises verdosas laminadas (Facies A), lutitas laminadas con limolitas arenosas interestratificadas (Facies B), areniscas con micro-*hummocky* y lutitas bioturbadas interestratificadas (Facies C), areniscas finas con estratificación entrecruzada *hummocky* y limolitas interestratificadas (Facies D) y areniscas con estratificación entrecruzada *hummocky* amalgamadas (Facies E).

Facies A: Lutitas grises verdosas laminadas

Esta facies corresponde a lutitas arcillosas grises verdosas finamente laminadas, friables (figuras 2 y 3a - b). Conforman paquetes lateralmente continuos de poco espesor (menor a 1 m) que se observan principalmente en los niveles basales del perfil. La fina laminación está determinada por la alternancia de láminas plano-paralelas, claras y oscuras, menor a 1 mm, bien preservadas. Esta facies es portadora de escasos restos de trilobites entre los cuales se

ha podido determinar la presencia de algunos céfalos de *Angelina* sp. así como fragmentos torácicos y pigidios de trilobites olénidos indeterminados.

Esta facies representaría la sedimentación en un medio donde la deposición de los sedimentos se produjo por caída desde suspensión en ausencia de olas y corrientes, por debajo del nivel de olas de tormenta. La laminación y ausencia de bioturbación podrían indicar bajos niveles de oxígeno en el fondo marino. La presencia de una fauna de olénidos en esta facies puede explicarse por la adaptación que sufrían algunos representantes de esta familia a vivir en condiciones ambientales de deficiencia de oxígeno (Esteban y Tortello, 2007).

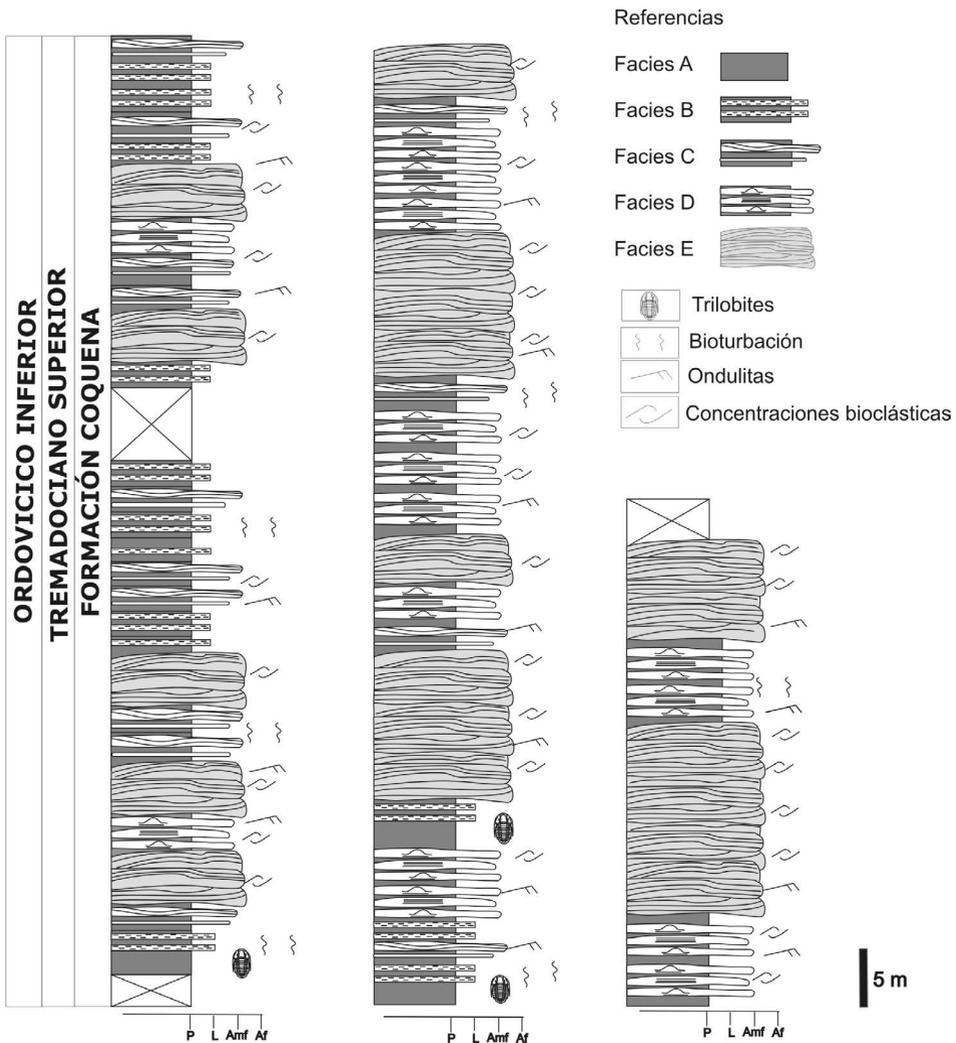


Figura 2. Perfil sedimentológico de la Formación Coquena en la quebrada de Chalala. / **Figure 2.** Stratigraphic section of Coquena Formation at Chalala creek.

Facies B: Lutitas laminadas con limolitas arenosas interestratificadas

La Facies B está conformada por lutitas arcillosas verdosas finamente laminadas con limolitas arenosas interestratificadas (figuras 2, 3a y b). Constituye paquetes inferiores a los 2 m de espesor, continuos lateralmente y con bases netas. La misma puede ser observada en distintos sectores del perfil y generalmente asociada a la Facies C. La laminación de las lutitas corresponde a una alternancia de láminas claras y oscuras, inferiores a 1 mm. Las limolitas arenosas, son grises claras a verdes, y por lo general se presentan muy alteradas, constituyendo bancos tabulares de 5 a 20 cm, con techo y base planos o levemente ondulados (figura 3c). Internamente son masivos o finamente laminados (figura 3d). Los niveles masivos suelen presentar bioturbación y en algunos casos se han observado tubos verticales de aproximadamente 10 cm de longitud, con un diámetro de 0.2 cm los cuales fueron asignados al icnogénero *Skolithos* isp. Este icnogénero se identifica tanto en planta, en forma de secciones subcirculares, como en corte transversal, en forma de tubos que presentan un relleno de material más oscuro y fino que el de la roca que los contiene (figura 3e). A nivel microscópico se observa una micro-laminación levemente ondulada, conformada por láminas de arcilla y muscovita, cuyos espesores varían entre 0.02 a 0.06 mm, y láminas de cuarzo y feldespato con un espesor máximo de 0.1 mm (figura 3f).

La Facies B refleja la acumulación de sedimentos en medios de baja energía por decantación de material pelítico. La presencia de bancos limo-arenosos, con base neta, masivos o laminados, podría reflejar depósitos de eventos que afectaron zonas más profundas donde corrientes de turbidez originadas por estos eventos fueron las responsables de transportar el material hacia la plataforma, mientras que, las lutitas laminadas corresponderían a la sedimentación de fondo. La presencia de *Skolithos* isp. en estos medios se encuentra restringida a depósitos de tormentas (MacEachern y Pemberton, 1997, Buatois *et al.*, 2002) donde estos organismos colonizan nichos disponibles posteriores al evento. Como se observa en este caso que el icnogénero mencionado se encuentra restringido a los niveles limo-arenosos, interpretados como depósitos de evento. Asimismo, la micro-laminación ondulada observada en corte delgado, puede ser asignada a la actividad de corrientes de fondo muy débiles que retrabajan el sedimento (O'Brien, 1996).

Facies C: Areniscas con micro-hummocky y lutitas bioturbadas interestratificadas

La Facies C consiste en la alternancia de areniscas muy finas a finas, grises a grises verdosas, con laminación entrecruzada micro-*hummocky* y de lutitas verdosas bioturbadas conformando paquetes de 2 a 5 m de potencia en distintos tramos del perfil (figuras 2 y 4a). Las capas arenosas se presentan fina a gruesamente estratificadas (5 a 65 cm de espesor) y constituyen bancos tabulares de bases netas, paralelas u onduladas. Internamente son masivos o pueden presentar laminación entrecruzada micro-*hummocky* (figura 4b) y laminación ondulática. Los techos presentan trenes de ondulaciones cuasi simétricas que muestran una ligera bifurcación (figura 4c). Sin embargo, es más común que los techos de estas capas se encuentren bioturbados. En las bases de algunos bancos se identifican delgados niveles bioclásticos, constituidos predominantemente por valvas desarticuladas de braquiópodos y escasa proporción de fragmentos de trilobites (figura 4d). Estas concentraciones bioclásticas son matriz-soportantes y presentan una disposición caótica de los restos. Los niveles pelíticos de esta facies presentan espesores que varían de 3 a 15 cm, se encuentran mayormente bioturbados aunque hay escasos sectores con una fina laminación paralela.

Esta facies refleja un ambiente de mayor energía con respecto a las Facies A y B. La presencia de capas arenosas con laminación entrecruzada micro-*hummocky*, laminación

ondulítica de oleaje y ondulas de crestas simétricas a casi simétricas indica la depositación por encima del nivel de base de olas de tormenta. Su origen estaría ligado a la decantación del material fino que alternaba con la depositación producida por eventos episódicos representados por las capas arenosas de bases erosivas.



Figura 3. Facies sedimentarias correspondientes a la plataforma (Facies A y B); a y b) Vista general de la Facies A y B ambas de escaso desarrollo dentro de la secuencia; c) Bancos de limolitas arenosas alteradas y pelitas laminadas de la Facies B; d) Laminación paralela en limolitas de la Facies B; e) Niveles de limolitas arenosas masivos con *Skolithos* isp; f) Micro-laminación levemente ondulada. / **Figure 3.** Sedimentary facies assigned to shelf (Facies A and B); a y b) General views of A and B facies; c) Sandy siltstones and laminated shales of B facies; d) Parallel lamination in sandy siltstones of B facies; e) Massive levels of siltstones with *Skolithos* isp; f) Micro-lamination slightly undulitic.

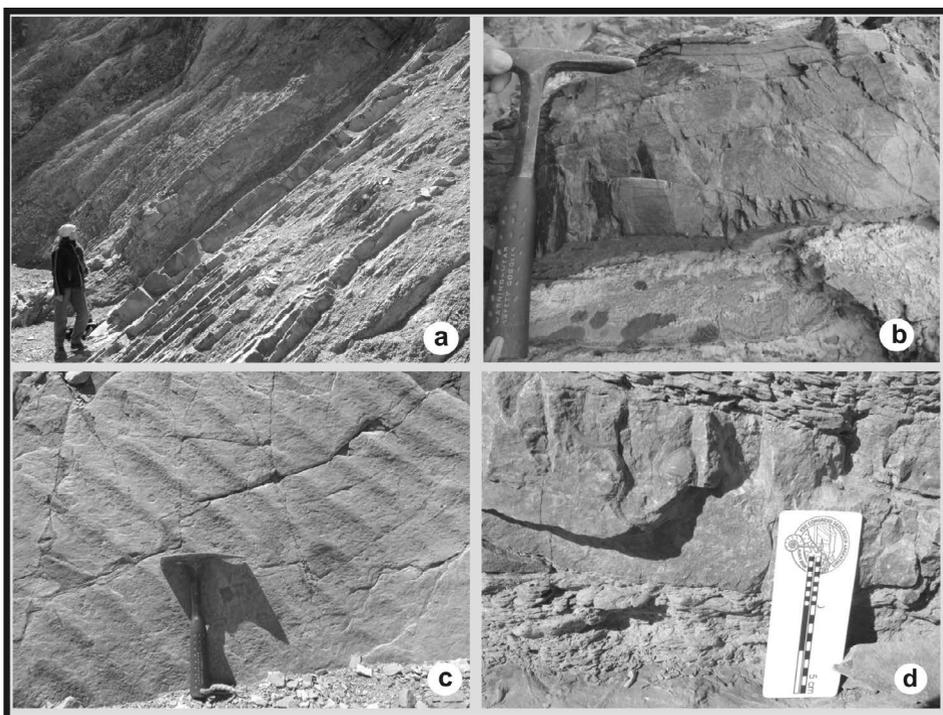


Figura 4. Facies sedimentarias de la Formación Coquena correspondientes a plataforma externa (facies C) a) Vista general de bancos arenosos intercalados con pelitas de la facies C; b) Niveles arenosos con laminación entrecruzada *hummocky* de la Facies C; c) Techos de niveles arenosos con trenes de ondas simétricas de la Facies C; d) Micro-laminación discontinua en arenas finas por actividad biogénica. / **Figure 4.** Sedimentary facies assigne to offshore (facies C) a) General view of sandy levels and interbedded shales of C facies; b) Sandstones with hummocky cross lamination of the C facies; c) Symmetric ripples on top of sandstones levels; d) Micro lamination in fine sandstones affected by biogenic activity.

Facies D: Areniscas muy finas a finas con estratificación entrecruzada *hummocky* y limolitas interestratificadas

Esta facies consiste en la alternancia de areniscas muy finas a finas, grises a grises verdosas, con estratificación entrecruzada *hummocky* y escasas limolitas arenosas verdosas laminadas. La misma se encuentra principalmente en el tramo medio y superior del perfil y constituye paquetes de 70 cm a 1.5 m de espesor y generalmente se encuentra asociada a la Facies E (figuras 2 y 5a). Los niveles arenosos forman bancos tabulares a lenticulares, de 3 a 80 cm de espesor, con contactos netos, paralelos u ondulados. Internamente pueden ser masivos o laminados paralelamente y presentar estratificación entrecruzada *hummocky*. Las bases de los bancos presentan niveles bioclásticos tabulares cuyo tamaño puede variar entre 20 y 60 cm (figura 5b). Al igual que los hallados en la Facies C son matriz-soportados, y están compuestos exclusivamente por restos de braquiópodos desarticulados y fragmentos de trilobites sin una orientación preferencial. En ocasiones los techos de estas capas pueden contener trenes bien marcados de ondulitas e intensa bioturbación (figura 5c).

Las estructuras sedimentarias presentes, el incremento en los niveles portadores de *Skolithos* isp. respecto a las facies anteriores y el mayor número de capas arenosas sugieren que esta facies se originó en ambientes de menor profundidad y mayor energía que la facies C. La presencia de estratificación entrecruzada *hummocky*, en varios niveles de esta facies, claramente pone en evidencia un origen ligado a eventos de tormenta.

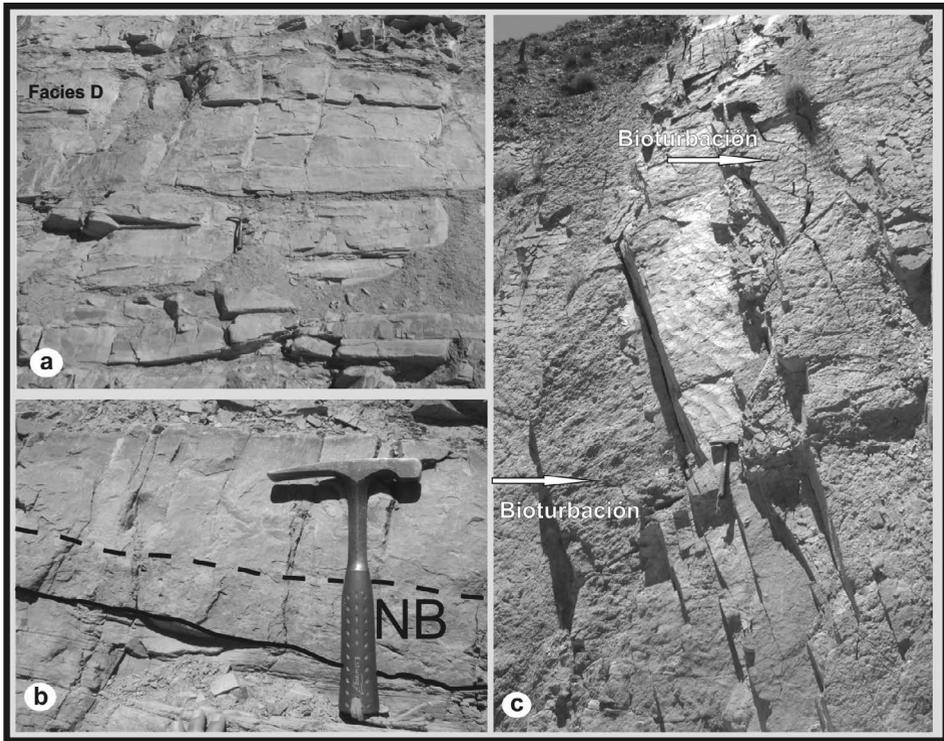


Figura 5. Facies sedimentarias de la Formación Coquena correspondientes a la zona de transición de la cara de playa (facies D), a) Bancos arenosos tabulares y lenticulares con escasas intercalaciones pelíticas. b) Bancos arenosos con laminación paralela y niveles bioclásticos en sus bases c) Techos de bancos arenosos con trenes de ondas asimétricas y bioturbados. / **Figure 5.** Sedimentary facies assigned to offshore transition (facies D), a) Tabular and lenticular sandstones with subordinate shales, b) Parallel lamination in sandstones and bioclastics levels, c) Bioturbation and asymmetrical ripples at the top of sandstones.

Facies E: Areniscas con estratificación entrecruzada hummocky amalgamadas

La Facies E está definida por areniscas finas, gris verdosas, con estratificación entrecruzada *hummocky* amalgamadas. La misma es observada en diversos tramos del perfil, en donde constituye paquetes de 40 cm hasta 1.5 m (figuras 2 y 6a). Esta facies presenta mayormente una geometría lenticular, aunque bancos con cierta continuidad lateral también pueden ser observados. Los lentes llegan a tener hasta 80 cm en su tramo más espeso. Internamente muestran una estratificación entrecruzada *hummocky* que a veces pasa hacia arriba a un nivel con laminación paralela. En el caso de los bancos tabulares solamente se ha observado laminación paralela a subparalela. Esta facies se caracteriza por la presencia de abundantes niveles bioclásticos conformando lentes o capas continuas en la base de los niveles arenosos (figura 6b), en algunos casos, donde la exposición del plano de estratificación es adecuada, se han identificado verdaderos pavimentos. La composición taxonómica de estos niveles es similar a las observadas en las otras facies y corresponde a fragmentos de braquiópodos y trilobites (figura 6c). Estructuras de deformación por carga como son las estructuras almohadilladas (*balls and pillows*) se encuentran asociadas a esta facies (figura 6d). A nivel microscópico también se ha podido identificar en esta facies la presencia de abundantes restos fósiles correspondientes a fragmentos de valvas de braquiópodos y trilobites, así como varias secciones circulares a ovaladas que han sido asignadas a equinodermos (figura 6d y f).

Esta facies refleja la depositación en zonas someras afectadas por eventos de elevada energía. La presencia de niveles con estratificación entrecruzada *hummocky* superpuestos (amalgamados), sin mediar entre ellos ningún nivel pelítico, se originan a partir de repetidos eventos tempestíticos donde la acción erosiva de las olas removió el material fino (Dott y Burgeois, 1982; Brenchley *et al.*, 1993). Las estructuras almohadilladas evidencian una elevada tasa de sedimentación, con lo cual su presencia en esta facies sería otro indicio de la génesis episódica de la misma.

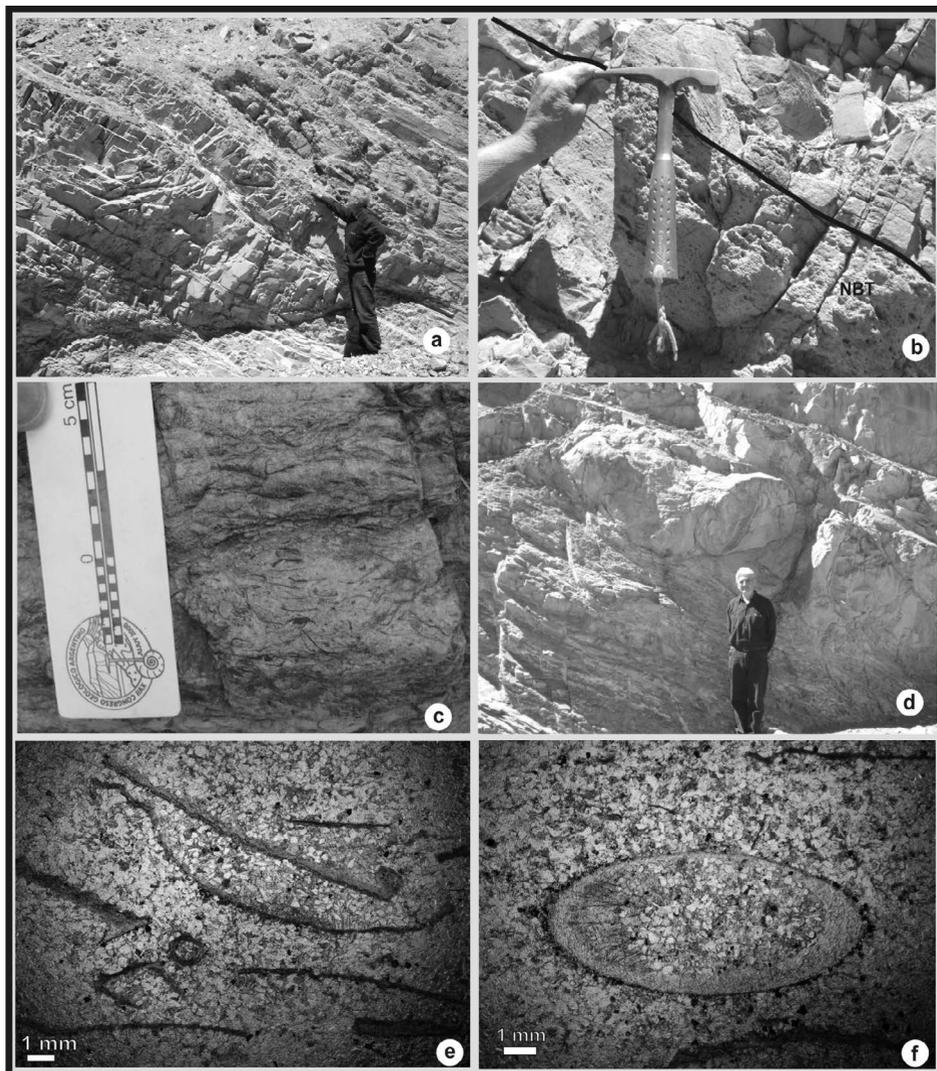


Figura 6. Facies sedimentarias de la Formación Coquena correspondientes a la cara de playa (facies E), a) Niveles arenosos amalgamados; b) Niveles bioclásticos tabulares (NBT); c) Detalle de niveles bioclásticos con restos desarticulados de valvas y trilobites; d) Niveles arenosos amalgamados y estructuras almohadilladas (*ball and pillows*); e-f) Restos fósiles a corte delgado correspondientes a fragmentos de valvas de braquiópodos, trilobites y secciones ovaladas asignadas a equinodermos. / **Figure 6.** Sedimentary facies assigned to shoreface (facies E), a) Amalgamated sandstones; b) Tabular bioclastics levels; c) Detail of bioclastics levels showing disarticulated shells and trilobites; d) Amalgamated sandstones and ball and pillows structure; e-f) Thin-section showing fragments of brachiopods shells, trilobites and oval sections assigned to echinoderms.

Ambiente de sedimentación

Las facies identificadas en la Formación Coquena en la zona de estudio sugieren que la misma se habría depositado en un ambiente de plataforma externa a cara de playa (*shoreface*) (figura 7). La sección está constituida predominantemente por material arenoso (areniscas muy finas a finas de color gris verdosa) en forma de bancos amalgamados, lentiformes o tabulares que están interestratificados con lutitas y limolitas. Los paquetes de material fino (lutitas y limolitas) solo se encuentran desarrollados en la base de los tramos inferior y medio del perfil. Hacia la parte superior de estos tramos, los niveles arenosos aumentan a expensas de las pelitas, llegando las mismas a desaparecer por completo.

La estratificación entrecruzada *hummocky* es la estructura más representativa de los cuerpos arenosos, la misma ha sido interpretada por numerosos autores como depósitos de mayor energía, producidos por tormenta (Brenchley *et al.*, 1986; Brenchley, 1989; Brenchley *et al.*, 1993). Teniendo en cuenta la presencia de estos niveles y siguiendo el esquema de clasificación de Mac Eachern y Pemberton (1992), en base a la frecuencia e intensidad de las tormentas, las capas con estratificación entrecruzada *hummocky* amalgamadas y bioturbadas de esta unidad reflejan un ambiente marino fuertemente afectado por tormentas. El elevado número de capas tempestíticas a través de todo el perfil, demuestra que la sedimentación tuvo lugar mayormente por encima del nivel de base de olas de tormenta (Facies C, D y E) (figura 7). No obstante, se pueden apreciar tramos del perfil donde la depositación tuvo lugar en zonas más profundas, pero que en algunos casos eran afectadas por estos eventos episódicos que transportaban material limo-arenoso a estas profundidades (Facies A y B) (figura 7).

La Facies A es exclusivamente lutítica y corresponde a la acumulación en un medio de baja energía donde la depositación de sedimentos se produjo por la decantación de material fino en ausencia de olas y corrientes, correspondiendo a la sedimentación de fondo (*background*). La fina laminación en estos depósitos y la falta de bioturbación podría estar indicando bajos niveles de oxígeno en la interface agua-sedimento (O'Brien, 1996; Oschmann, 1991; Savrda y Bottjer, 1991). Si bien esta característica paleoambiental del medio es influyente sobre el desarrollo de la fauna marina, la presencia de trilobites olénidos en la Facies A podría representar una excepción, dado que se ha comprobado que ciertos elementos de la biofacies de olénidos han sufrido adaptaciones para vivir bajo tales condiciones de deficiencia de oxígeno (Esteban y Tortello, 2007). La presencia en este ambiente de bancos delgados y continuos conformados por Limolitas arenosas intercalados en secuencias de aguas profundas (Facies B) refleja los primeros indicios de sedimentación episódica y son interpretadas como depósitos de turbiditas inducidas por tormentas (Hambling y Walker, 1979; Walker *et al.*, 1983; Brenchley, 1985). Bajo condiciones normales se produce la decantación de material fino en suspensión, pero durante las tempestades se generaban corrientes de turbidez que eran las responsables del transporte y depositación de volúmenes de arena en la plataforma (Hambling y Walker, 1979; Mónaco, 1992). Estos niveles indican, a su vez, un posible aumento en la oxigenación del medio con respecto a la Facies A, lo que es reforzado por la presencia en la facies B de trazas fósiles, como *Skolithos* isp., y bioturbación indiferenciada, restringida a los niveles limo-arenosos.

La facies C, conformada por capas arenosas con laminación entrecruzada micro *hummocky* y delgados niveles bioclásticos separadas por paquetes pelíticos, representan la sedimentación en la plataforma interna donde la alternancia de arenas y pelitas es característica (Pemberton *et al.*, 2001) (figura 7). Esta alternancia refleja que la decantación de material fino era alterada

por la acción de eventos de tormenta, generando bancos limo-arenosos o arenosos de bases erosivas. Depósitos de estas características han sido interpretados por otros autores como tempestitas distales, generadas inmediatamente por encima del nivel de base de olas de tormentas (Brenchley, 1985; Brenchley *et al.*, 1986). En este medio, la proporción de estructuras físicas y biogénicas varía en función de la acción de las tormentas, así se observa que en algunos sectores de esta facies se presenta un buen desarrollo de laminación entrecruzada y estructuras de oscilación y en otros existe una mayor homogeneización de los sedimentos por bioturbación con presencia relicta de las estructuras, como ser laminación paralela u ondulítica.

Como ha sido mencionado anteriormente, los niveles arenosos con estratificación entrecruzada *hummocky* indican la depositación por encima del nivel de base de olas de tormenta (Facies C, D y E) siendo producida por la actividad de flujos combinados y oscilatorios en medios de mayor energía durante eventos tempestíticos. El aumento en la secuencia estudiada del número y espesor de los bancos arenosos con estratificación entrecruzada *hummocky*, y la disminución del material pelítico intercalado (Facies D) estaría reflejando una mayor proximidad a la costa, posiblemente zonas de la plataforma interna cercana a la cara de playa. En este medio las capas arenosas con estructuras generadas por la acción de olas separadas por escaso material pelítico han sido interpretadas como los términos más proximales de eventos de tormentas (Brenchley, 1985; Brenchley *et al.*, 1986). En varios casos principalmente en los tramos superiores del perfil, estos cuerpos arenosos llegan casi al metro de espesor y se encuentran amalgamados (Facies E) (figura 7), este tipo de depósito es típico de la zona de cara de playa y se originan a partir de repetidos eventos tempestíticos, donde la acción erosiva de las olas removió el material fino y erosionan los depósitos previos. En esta facies la mayor oxigenación de las aguas permite un desarrollo importante de nutrientes lo cual queda reflejado en un incremento de la bioturbación observada en estos niveles.

Coincidente con el aumento de la bioturbación en el perfil de la quebrada de Chalala, ocurre la aparición de niveles bioclásticos (Facies C a E). Estos depósitos muestran espesores variables, aunque los de mayor potencia han sido observados dentro de la Facies D y E. Pueden constituir capas o lentes que se encuentran en la base de los bancos y que se originarían posiblemente durante el pico de los eventos tempestíticos, cuando el material bioclástico es retrabajado, reorientado y retransportado cercano al área de aporte (Kreisa y Bambach, 1982). Los elementos que conforman estos biodepósitos presentan un alto grado de desarticulación y gran concentración, distribución predominantemente aleatoria y fragmentación, permitiendo inferir que su génesis tuvo lugar en medios de elevada energía.

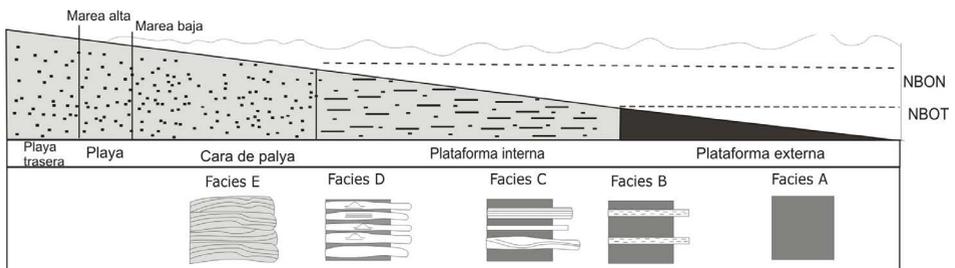


Figura 7. Perfil esquemático de la plataforma mostrando la ubicación de las facies sedimentarias (Modificado de Buatois y Mángano, 2011)./ **Figure 7.** Schematic log of the shelf showing the distribution of sedimentary facies. (Modified of Buatois and Mángano, 2011).

Las características sedimentológicas de la Formación Coquena reflejan que dicha unidad corresponde a la acumulación de material siliciclástico, principalmente arenoso sobre una plataforma altamente dominada por tormentas donde pueden distinguirse distintos subambientes desde plataforma externa a cara de playa (*shoreface*). Teniendo en cuenta esto y la información bioestratigráfica existente (Rao *et al.*, 1994; Ottone *et al.*, 1995; Benedetto y Carrasco, 2002; Zeballo *et al.*, 2008) se considera que la secuencia aquí estudiada representa el miembro inferior heterolítico de Benedetto y Carrasco (2002) del Tremadociano tardío.

Conclusiones

Del análisis paleoambiental de la Formación Coquena podemos concluir que la sucesión se habría depositado en una plataforma somera con sedimentación siliciclástica sobre el margen sudoccidental de Gondwana. Esta plataforma estaba altamente influenciada por la acción de tormentas, siendo estos eventos los responsables del transporte del material arenoso.

Las facies sedimentarias identificadas representan distintos subambientes dentro de la plataforma:

La Facies A corresponde a la sedimentación de fondo (*background*) en un ambiente de plataforma externa donde se produce la depositación por caída en suspensión del material en ausencia de olas y corrientes indicando su depositación por debajo del nivel de olas de tormenta.

La Facies B refleja un ambiente de plataforma posiblemente debajo del nivel de base de olas de tormenta pero que llegó a ser afectada por escasos eventos de sedimentación episódica representados por capas limo-arenosas depositadas a partir de corrientes de turbidez, generadas durante las tormentas, que transportaron el material limo-arenoso a la plataforma.

La Facies C representa los depósitos originados en un ambiente de plataforma interna, donde la decantación del material fino alterno con eventos de génesis episódica evidenciados por la presencia de capas arenosas con laminación micro-*hummocky*.

La Facies D evidencia la sedimentación en una zona de plataforma interna cercana a la cara de playa donde la alternancia de niveles arenosos espesos y con estratificación entrecruzada *hummocky* y niveles pelíticos es característico.

La Facies E representan los sedimentos acumulados en la cara de playa como sugieren las capas amalgamadas con estratificación entrecruzada *hummocky* y la ausencia de niveles pelíticos reflejando un medio de mayor energía y cercanía a la costa.

La presencia de potentes paquetes arenosos con estratificación *hummocky* amalgamados y los numerosos niveles bioclásticos de bases erosivas (Facies D y E), cuyas características como grado de desarticulación, distribución aleatoria de sus elementos y grado de fragmentación, confirman la acción de flujos turbulentos, posiblemente durante el pico de los eventos de tormenta (Kreisa y Bambach, 1982).

El análisis de esta sección y la información sedimentológica y bioestratigráfica existente han permitido asignar estas sedimentitas al miembro inferior heterolítico de la Formación Coquena definido por Benedetto y Carrasco (2002).

Bibliografía

- Aceñolaza, F., Buatois, L., Mángano, G., Esteban, S., Tortello, F. y Aceñolaza, G. 1999. Cámbrico y Ordovícico del noroeste argentino. En: Caminos, R. (ed.) *Geología Argentina*. Anales Instituto de Geología y Recursos Minerales, 29: 169-187.
- Amengual, R. y Zanettini, J. 1974. Geología de la Quebrada de Humahuaca entre Uquía y Purmamarca (provincia de Jujuy). *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 29: 30-40.
- Astini, R. 2003. The Ordovician Proto-Andean Basin. En: Benedetto, J. (ed.) *Ordovician fossils of Argentina*. Secretaría de Ciencia y Tecnología, Universidad Nacional de Córdoba, 1-74.
- Astini, R. 2008. Sedimentación, facies, discordancias y evolución paleoambiental durante el Cambro-Ordovícico. En: Coira, B. y Zappettini, E. (eds.) *Geología y recursos naturales de la provincia de Jujuy*. 17º Congreso Geológico Argentino, Relatorio: 50-70.
- Benedetto, J. y Carrasco, P. 2002. Tremadocian (earliest Ordovician) brachiopods of Purmamarca and the Sierra de Mojotoro, Cordillera Oriental of northwestern Argentina. *Geobios*, 35: 647-661
- Brenchley, P. 1985. Storm influenced sandstone beds. *Modern Geology*, 9: 369-396
- Brenchley, P. 1989. Storm Sedimentation. *Geology Today*: 133-137.
- Brenchley, P., Romano, M. y Gutiérrez Marco, J. 1986. Proximal and distal hummocky cross-stratified facies on wide Ordovician shelf in Iberia. En: Knight, R. y McLean, J. (eds.), *Shelf Sands and Sandstones*. Canadian Society of Petroleum Geologists Memoir, 2: 241-255.
- Brenchley, P., Pickerill, R. y Stromberg, G. 1993. The role of wave reworking on the architecture of storm sandstones facies, Bell Island Group (Lower Ordovician), eastern Newfoundland. *Sedimentology*, 40: 359-382.
- Buatois, L. y Mángano, G. 2003. Sedimentary facies and depositional evolution of the Upper Cambrian to Lower Ordovician Santa Rosita Formation in northwest Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, 16: 343-363.
- Buatois, L. y Mángano, G. 2011. Ichnology: The role of organism-substrate interactions in space and time. *Cambridge University Press*, 358p
- Buatois, L.A., Mángano, G. M. y Aceñolaza, F. G.. 2002. Trazas fósiles. Señales de comportamiento en el registro estratigráfico. *Edición Especial Museo Paleontológico Egidio Feruglio*, 2: 1-382.
- Dott, R. y Bourgeois, J. 1982. Hummocky stratification: Significance of its variable bedding sequence. *Geological Society of American Bulletin*, 93: 663-680.
- Esteban, S. y Tortello, F. 2007. Latest Cambrian sedimentary settings and trilobite faunas from the western Cordillera Oriental, Argentina. *Memoirs of the Association of Australasian Paleontologists*, 34: 431-460.
- Hamblin, A. y Walker, R. 1979. Storm-dominated shallow marine deposits: The Fernie-Kootenay (Jurassic) transition, southern Rocky Mountains. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 16: 1673-1690.
- Harrington, H. 1938. Sobre las faunas del Ordovícico Inferior del norte argentino. *Revista Museo de La Plata (n.s) Sección Paleontología*, 4: 209-289.
- Harrington, H. 1957. Ordovician Formation of Argentina. En: Harrington y Leanza (eds), *Ordovician trilobites of Argentina*. Department of Geology, University of Kansas Special Publication 1-39 p.
- Harrington, H. y Leanza, A. 1957. Ordovician trilobites of Argentina. *Department of Geology, University of Kansas Special Publication*, 276 p.
- Kobayashi, T. 1936. On the *Parabolinella* fauna from Province Jujuy, Argentina. *Japanese Journal of Geology and Geography*, 13: 85-102.
- Kobayashi, T. 1937. The Cambro-Ordovician Shelly Faunas of South America. *Journal of the Faculty of Science, Imperial University of Tokio, Section II*, 4 (4): 369-522.
- Kreisa, R. y Bambach, R. 1982. The role of storm processes in generating shell beds in paleozoic shelf environments. En: G., Einsele y A., Seilacher (eds.), *Cyclic and Event Stratigraphy*. Springer-Verlag, 200-207p. Berlin.
- Mac Eachern, J. y Pemberton, S. 1992. Ichnological aspects of Cretaceous shoreface successions and shoreface variability in the western interior seaway of Northamerica. En: Pemberton, S. (ed.) *Applications of ichnology to petroleum exploration*. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists. Core Workshop, 17: 57-84.
- Mac Eachern, J. y Pemberton, S. 1997. Ichnology: biogenic utility in genetic stratigraphy. *Canadian Society of Petroleum Geologists-Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Joint Convention* (Calgary), Notes Core Conference, pp 387-412.
- Mángano, G. y Buatois, L. 2004. Integración de estratigrafía secuencial, sedimentología e icnología para un análisis cronoestratigráfico del Paleozoico Inferior del noroeste argentino. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 59: 273-280.
- Mángano, G., Buatois, L. y Aceñolaza, G. 1996. Trace fossils and sedimentary facies from Late Cambrian-early Ordovician tide dominated shelf (Santa Rosita Formation, northwest Argentina): Implications for ichnofacies models of shallow marine secession's. *Ichnos*, 5: 53-88.
- Mángano, G., Buatois, L. y Muñiz Guinea, F. 2005. Ichnology of the Alfarcito Member (Santa Rosita Formation)

- of northwestern Argentina: Animal-substrate interactions in lower Paleozoic wave-dominated shallow sea. *Ameghiniana* 42: 641- 668.
- Monaco, P. 1992. Hummocky cross-stratified deposits and turbidites in some sequences of the Umbria-Marche area (central Italy) during the Toarcian. *Sedimentary Geology*, 77: 123-142.
- Moya, M. 1988. Lower Ordovician in the southern part of the Argentine Eastern Cordillera. *Lecture Notes in Earth Sciences*, 17: 55-69.
- Moya, M. 1999. El Ordovícico de los Andes del Noroeste Argentino. En: González Bonorino, G.; Omarini, R. y Viramonte, J. (eds.), *Geología del Noroeste Argentino*. 14º Congreso Geológico Argentino, Relatorio, 1: 134-152
- Moya, M. 2002. The Ordovician Basins of Northern Argentina. En: Aceñolaza, F. (ed.). *Aspects of the Ordovician System in Argentina*. Serie de Correlación Geológica, 16: 281-294.
- Moya, M. 2008. El Paleozoico inferior en el noroeste argentino. Evidencias, incógnitas, propuestas para la discusión. En: Coira, B. y Zappettini, E. (eds.), *Geología y recursos naturales de la provincia de Jujuy*. 17º Congreso Geológico Argentino, Relatorio: 74-84.
- O'Brien, N. 1996. Shale lamination and sedimentary processes. En: Kemp, A. (ed.) *Palaeoclimatology and palaeoceanography from laminated sediments*. Geological Society Publication, 116: 23-36.
- Oschmann, W. 1991. Anaerobic-Poikiloaerobic-Aerobic: a new facies zonation for modern and ancient neritic redox facies. En: Einsele et al. (eds.) *Cycles and events in stratigraphy*. Springer-Verlag Berlín Heidelberg, 565-571.
- Ottone, E., Waisfeld, B. y Astini, R. 1995. Acritarcas del Ordovícico Temprano en la Quebrada de Chalala, Noroeste de Argentina. *Ameghiniana* 32: 237-242.
- Pemberton, S., Spila, M., Pulham, A., Saunders, T., MacEachern, J., Robbins, D. y Sinclair, I. 2001. Ichnology and Sedimentology of Shallow to Marginal Marine Systems, Ben Nevis and Avalon Reservoirs, Jeanne d'Arc Basin. *Geological Association of Canada, Short Course Notes*, 15: 343 pp.
- Ramos, V., Turic, M. y Zuzek, A. 1967. Geología de las Quebradas de Huichaira-Pocoya, Purmamarca y Tumbaya Grande en la margen derecha de la Quebrada de Humahuaca (Provincia de Jujuy). *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 22: 209-221.
- Rao, R., Hünicken, M. y Ortega, G. 1994. Conodontes y graptolitos del Ordovícico inferior (Tremadociano-Arenigiano) en el área de Purmamarca, Provincia de Jujuy, Argentina. *Anales de Academia brasilera de Ciencias*, 66: 59-83.
- Savrda, Ch. y Bottjer, D. 1991. Oxygen-related biofacies in marine strata: an overview and update. En: Tyson, R. y Pearson, T. (eds.) *Modern and ancient continental shelf anoxia*. Geological Society Special Publication, 58: 201-219.
- Tortello, F. 1996. *Geragnostus nesosii* Harrington y Leanza, 1957 (Trilobita, agnostida) en el Tremadociano Superior del noroeste argentino. *13º Congreso Geológico Argentino y 3º Congreso de Exploración de Hidrocarburos*. Actas 5: 17-25.
- Turner, J. 1960. Estratigrafía de la Sierra de Santa Victoria y adyacencias. *Boletín de la Academia Nacional de Ciencias de Córdoba*, 41: 163-196.
- Walker, R., Duke, W. y Leckie, D. 1983. Hummocky stratification: Significance of its variable bedding sequences: Discussion and reply. *Geological Society of America Bulletin*, 94: 1245-1251.
- Zeballo, F., Albanesi, G. y Ortega, G. 2008. New Late Tremadocian (Early Ordovician) conodont and graptolite records from the southern South American Gondwana margin (Eastern Cordillera, Argentina). *Geologica Acta*, 6: 131-145.

Recibido: 23/06/2013

Aceptado: 20/11/2013