

ANÁLISIS INTEGRADO DE LA TRANSICIÓN ENTRE LAS FORMACIONES VACA MUERTA Y QUINTUCO Y SU IMPLICANCIA PALEOAMBIENTAL EN EL PERFIL DE PUERTA CURACO, CUENCA NEUQUINA

Ignacio A. Capelli¹, Roberto A. Scasso¹, Diego A. Kietzmann¹, Daniel Minisini²,
 Fernanda Cravero¹, Juan P. Catalano¹

1: IGeBA-CONICET, igan.capelli@gmail.com, rscasso@yahoo.com.ar, diegokietzmann@gl.fcen.uba.ar,
 fcravero@cetmic.unlp.edu.ar, juancatalano@gl.fcen.uba.ar

2: Shell, daniel.minisini@shell.com

Palabras clave: Formación Vaca Muerta, Formación Quintuco, transición, dolomita, geoquímica, mineralogía

ABSTRACT

Integrated analysis of the transition between Vaca Muerta and Quintuco Formations and its paleoenvironmental implication in the Puerta Curaco section, Neuquén Basin

The Vaca Muerta-Quintuco system in the Puerta Curaco section (northern Neuquén Basin), consists of a 716 m thick shallowing-upward cycle deposited from early Tithonian to early Valanginian. The Vaca Muerta Formation represents a world-class unconventional play since 2010, nevertheless, there is not agreement on the stratigraphic position of the top of Vaca Muerta Formation yet. This contribution provides a stratigraphic analysis of the vertical transition (35 m) between the Vaca Muerta and the Quintuco Formations, including sedimentological, geochemical and mineralogical analysis. The transition interval is characterized by: 1) an increase of calcareous shales compared to the underlying unit 2) a broad and smooth peak of Gamma-Ray associated to high values of K and Th 3) an increase in clay minerals (illite, chlorite and mixed-layered illite/smectite) when compared to the underlying unit 4) relative low values of Mo and U, suggesting a decrease in the organic content and 5) complete dolomitization of the limestones beds. These observations indicate an important change in the paleoenvironmental conditions, suggesting an increase in detrital sedimentation and the emplacement of a mixed siliciclastic-carbonate system. These changes are associated to a pronounced sea-level fall, based on the configuration of regional seismic data. The high-resolution insights derived from this study in Puerta Curaco section may be used to gain further knowledge in the subsurface sections where the lack of core in the key stratigraphic sections hampers such inferences.

INTRODUCCIÓN

El sistema Vaca Muerta-Quintuco (Tithoniano-Valanginiano) ha sido objeto de estudio en numerosas oportunidades debido al rol transcendental que desempeña en los distintos sistemas petroleros de la Cuenca Neuquina (e.g., Schiuma *et al.* 2002; Uliana *et al.* 2014). En particular, la sedimentología y estratigrafía de la Formación Quintuco ha sido analizada debido a la importancia

que presenta como reservorio convencional en facies de plataforma proximal (Carozzi *et al.* 1993; Olmos *et al.* 2002). Por otro lado, el progresivo desarrollo de los yacimientos no convencionales en las últimas décadas ha posicionado a la subyacente Formación Vaca Muerta como objetivo de reservorio tipo *shale*. Es por ello que, en los últimos años, se han intensificado los estudios geológicos en la Formación Vaca Muerta con el objetivo de mejorar el conocimiento estratigráfico, petrofísico y geomecánico de la unidad (e.g., Fantín *et al.* 2014; Sagasti *et al.* 2014; Repol *et al.* 2014; Kietzmann *et al.* 2014, 2016; Crousse *et al.* 2015; Domínguez *et al.* 2017).

Pese a los numerosos estudios realizados en ambas unidades, en áreas depocentrales, la sucesión Tithoniana-Valanginiana presenta una notable homogeneidad litofacial, dificultando la discriminación entre las formaciones Vaca Muerta y Quintuco (Leanza *et al.* 2011). Por otro lado, en operaciones de subsuelo, suele establecerse el pase de la Formación Quintuco a la Formación Vaca Muerta a partir de un aumento en el contenido de materia orgánica y en la porosidad total, valores estimados y calculados a partir de perfilajes eléctricos. A modo de ejemplo, se ha utilizado un valor de *cut-off* < 1% de carbono orgánico total para caracterizar a las sedimentitas de la Formación Quintuco en áreas depocentrales (Sagasti *et al.* 2014) o, en otros casos, criterios sismo-estratigráficos, para el reconocimiento del mencionado contacto (Fantín *et al.* 2014). Al igual que en subsuelo, se reconoce en afloramiento una marcada disminución del contenido orgánico entre el pasaje de las unidades Vaca Muerta a Quintuco (Kietzmann *et al.* 2016).

En la zona de la faja plegada y corrida de Chos Malal, Kietzmann *et al.* (2016) establecieron el pasaje entre ambas unidades a partir de un cambio composicional representado por un descenso brusco en el TOC y el contenido de calcita, así como un incremento importante en el contenido de arcillas y terrígenos, que tuvo lugar en el Berriasiano tardío. Mas aún, la transición entre las formaciones Vaca Muerta y Quintuco fue caracterizada previamente como una sucesión de pelitas negras laminadas que se intercalan con dolomías (Kietzmann *et al.* 2016), cuyo porcentaje de dolomita resulta mayor al 85 % (Scasso *et al.* 2017). Por otro lado, la Formación Quintuco puede dividirse en dos grandes subunidades, una de carácter carbonático (Tithoniano-Berriasiano) y otra de características mixtas (Berriasiano-Valanginiano) (Olmos *et al.* 2002).

La presente contribución tiene como objetivo principal la descripción, caracterización y discusión del significado paleoambiental de la transición entre ambas unidades en la localidad de Puerta Curaco, a partir de la integración de múltiples parámetros. Estudios realizados previamente en subsuelo y afloramiento revelaron una fuerte anomalía de Gamma-Ray en la sección superior de la Formación Vaca Muerta (e.g., Vallejo *et al.* 2016; Weger *et al.* 2017a), la cual será, junto a estudios geoquímicos, mineralógicos y faciales, el objeto de estudio del presente trabajo. Adicionalmente, se correlaciona la transición entre ambas unidades del perfil de Puerta Curaco con otros sectores de la cuenca, posicionando el estudio en un contexto de evolución paleogeográfica y paleoambiental regional. El intervalo estratigráfico analizado presenta un espesor total de 90 m, incluyendo lo que aquí se denominará “intervalo de transición”, de 35 m de espesor.

MARCO ESTRATIGRÁFICO Y ANTECEDENTES DEL ÁREA DE ESTUDIO

El sistema Vaca Muerta-Quintuco integra, junto a la Formación Tordillo, la sección inferior del Grupo Mendoza (Mesosecuencia Mendoza Inferior, Legarreta y Gulisano 1989), limitado en su techo por la discordancia Intravalanginiana o huncálica, que lo separa de la suprayacente Formación Mulichinco (Gulisano *et al.* 1984; Leanza 2009).

Los depósitos marinos del sistema Vaca Muerta-Quintuco (Tithoniano-Valanginiano) se encuentran representados por una serie de secuencias depositacionales desarrolladas bajo fuerte influencia del nivel del mar (Mitchum y Uliana 1985). Particularmente, los depósitos basales de la Formación Vaca Muerta han sido interpretados como el resultado de un evento transgresivo de gran extensión paleogeográfica sucedido durante el Tithoniano, dando lugar a la deposición de las pelitas ricas en materia orgánica (Weaver 1931, Legarreta y Uliana 1991). La sedimentación del sistema se desarrolló bajo un régimen de subsidencia termal relativamente constante en un ambiente de retroarco (Mitchum y Uliana 1985; Legarreta y Uliana 1991), dando lugar a depósitos marinos de cuenca y talud, de rampa externa, plataforma mixta y facies laterales equivalentes marino-marginales (Leanza y Hugo 1977; Legarreta y Gulisano 1989; Spalletti *et al.* 2000; Scasso *et al.* 2002; Kietzmann *et al.* 2014b). Durante dicho período, la cuenca Neuquina recibió una abundante cantidad de material volcánico proveniente del arco de islas situado al oeste (Legarreta y Uliana 1991) y evidenciado en los depósitos por la presencia de niveles tobáceos (e.g., Kietzmann *et al.* 2014, 2016; Meissinger y Lo Forte 2014).

El área de estudio se encuentra en la localidad de Puerta Curaco (norte de la Provincia de Neuquén), ubicada 30 km al este de Chos Malal (Figs. 1A y 1B). La estratigrafía del área abarca el intervalo comprendido desde el Kimmerdigiano hasta el Valanginiano tardío, incluyendo las Formaciones Auquileo, Tordillo, Vaca Muerta, Quintuco, Mulichinco y Agrio (e.g., Weaver 1931; Groeber 1946; Spalletti y Veiga 2007; Schwarz *et al.* 2011; Lucci y Lazo 2012; Spalletti *et al.* 2014; Kietzmann *et al.* 2014, 2016; Weger *et al.* 2017a, b). La sucesión sedimentaria fue estudiada sobre el flanco oriental del anticlinal La Yesera (Figs. 1B y 1C) en donde el sistema Vaca Muerta-Quintuco presenta un espesor total de 716 m (Capelli *et al.* 2017a). El mismo apoya en concordancia sobre las limolitas verdes de la Formación Tordillo y es cubierto por los depósitos arenosos de la Formación Mulichinco (Fig. 1C). En el mismo perfil, D'Odorico (2009) caracterizó las principales litofacies y microfacies de la Formación Vaca Muerta agrupándolas en un ambiente de rampa carbonática homoclinal, con una muy baja tasa de sedimentación, que interpretó como resultante de fluctuaciones de aporte terrígeno. Weger *et al.* (2017a, b) realizaron estudios de estratigrafía secuencial, distribución de materia orgánica y radioactividad natural en el sistema, junto a estudios diagenéticos en niveles de calcita tipo beef-veins (ver Rodríguez *et al.* 2009). Por otro lado, Legarreta (2009) realizó estudios en las formaciones Quintuco y Mulichinco, registrando un bajo contenido de materia orgánica, que disminuye hacia el tope de la Formación Mulichinco, como resultado de un aumento de oxigenación del medio.

Kietzmann *et al.* (2016) realizaron un estudio de facies y estratigrafía secuencial, caracterizando al sistema Vaca Muerta-Quintuco como un ciclo de somerización, donde los depósitos de cuenca/rampa externa carbonática de la Formación Vaca Muerta son cubiertos por depósitos marinos de cuenca a shoreface inferior (plataforma mixta silicoclástica-carbonática) de la Formación Quintuco. Identificaron 5 secuencias compuestas y 15 secuencias de alta frecuencia, así como las tendencias generales en el TOC, contenido de calcita, terrígenos y arcillas. La fracción arcillosa se encuentra conformada por interestratificados illita/esmectita para la Formación Vaca Muerta, mientras que la Formación Quintuco presenta un continuo enriquecimiento en illita respecto a interestratificados illita/esmectita (Kietzmann *et al.* 2016). Dicho enriquecimiento sería causado por aumento de material detrítico, coherente con lo observado en las areniscas asociadas (Kietzmann *et al.* 2016). El tramo superior de la Formación Quintuco se encuentra dominado por illita y clorita. Estudios realizados en el área sobre la materia orgánica y la mineralogía de las margas y pelitas calcáreas de las formaciones Vaca Muerta y Quintuco indican que el sistema alcanzó un importante grado diagenético, registrando valores de Tmax promedio de 520°C (Kietzmann *et al.* 2016), coherente con el alto grado de illitización observado en los interestratificados de illita/esmectita y la diagénesis mineral encontrada (Capelli *et al.* 2017b).

METODOLOGÍA

Con el fin de caracterizar la transición entre ambas unidades, dentro del marco de un estudio completo de la unidad, se realizó un perfil sedimentológico banco a banco (representado a escala 1:650 en la Fig. 2) que abarca los 34 m finales de la Formación Vaca Muerta y los 56 m basales de la Formación Quintuco. Se realizó un muestreo de margas y pelitas a intervalos aproximados de 10 m intensificando el mismo a intervalos promedio de 5 m en el intervalo de transición entre ambas unidades (Fig. 2).

Las posiciones estratigráficas absolutas se encuentran referidas a la base de la Formación Vaca Muerta. De esta manera, el límite entre las formaciones Vaca Muerta y Quintuco fue posicionado en la base de la dolomía basal, ubicada a los 407 m (Fig. 2). El intervalo analizado de la Formación Vaca Muerta corresponde a parte del denominado “Vaca Muerta Superior”, descrito en subsuelo para áreas del engolfamiento o plataforma nororiental, típicamente empobrecido en materia orgánica con respecto a la sección “Vaca Muerta Inferior” (e.g., Stinco y Mosquera 2003; Sagasti *et al.* 2014; Fantín *et al.* 2014).

Se realizaron mediciones de radioactividad natural espectral utilizando un equipo RS 230 Gamma-Ray Spectrometer a intervalos regulares de 1 m. Como resultado se obtuvieron 4 curvas: radioactividad total (nSv/h) junto a los 3 componentes espectrales: K (%), Th (ppm) y U (ppm). Para estimar la contribución detrítica y autigénica del U, se utilizó la ecuación: $U_{\text{authigenic}} = U_{\text{total}} - Th/3$ (Wignall y Myers 1988; Correia *et al.* 2012).

Se determinó la mineralogía de roca total y de la fracción arcillosa ($< 2 \mu\text{m}$) sobre un total de 19 muestras de margas y pelitas calcáreas. Para ello se utilizaron los difractómetros Phillips X-Pert PW3710 y Bruker D2 Phaser. La mineralogía arcillosa se estableció a partir de la posición de los planos 001 en 3 preparados orientados (natural, etileno-glicol y calentado a 550°C , Moore y Reynolds 1997).

Con el fin de evaluar variaciones mineralógicas verticales, se realizaron semicuantificaciones según el área del pico principal (100% intensidad), a excepción del cuarzo (pico de $4.2 \text{ \AA}$ de intensidad del 20%) y arcillas totales (pico de $4.5 \text{ \AA}$ de intensidad del 50%), empleando 5 y 2 como factores de corrección respectivamente (e.g., Xu *et al.* 2017). Sobre dichas muestras y con el fin de

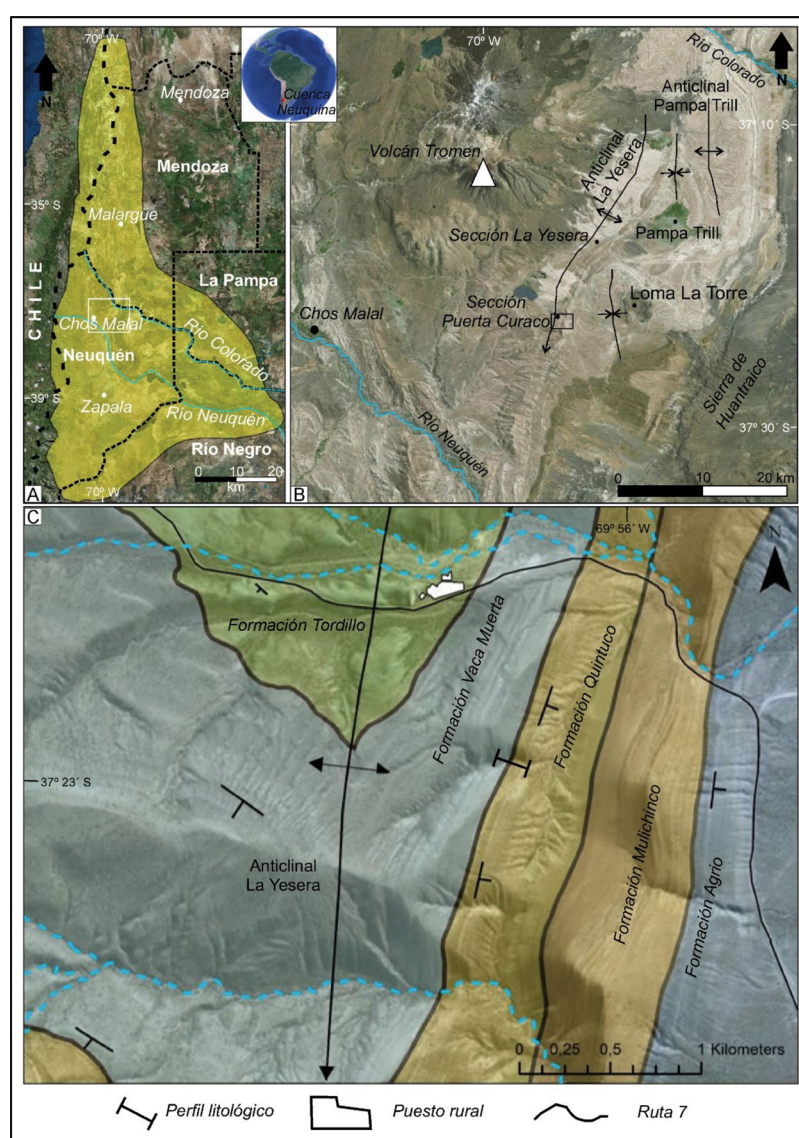


Figura 1. A) Extensión de la cuenca Neuquina y localidad del área de estudio. B) Rasgos geológicos principales del área de estudio, caracterizada por una serie de anticlinales y sinclinales norte-sur (Kozłowski *et al.* 1996). C) Mapa geológico del flanco oriental del anticlinal La Yesera mostrando la ubicación del perfil relevado del intervalo Vaca Muerta-Quintuco.

discriminar variaciones geoquímicas elementales, se efectuaron mediciones de FRX con un equipo portable Niton XL3t Ultra Analyzer, determinando los siguientes componentes mayoritarios y trazas: Si, Ca, Al, K, Fe, K, S, Ti y Mo.

Para los análisis geoquímicos y mineralógicos se siguieron los criterios de Calvert y Pedersen (2007) y de Montero Serrano *et al.* (2015) a fin de caracterizar fluctuaciones en el aporte detrítico.

RESULTADOS

Perfil litoestratigráfico

En el presente trabajo se analizó la transición entre ambas unidades, estudiando el intervalo comprendido entre los 373 y los 463 m del perfil elaborado por Capelli *et al.* 2017b (Fig. 2), correspondiente al Berriasiano tardío-Valanginiense temprano (Kietzmann *et al.* 2016a, b).

El tramo analizado de la Formación Vaca Muerta se ubica entre los 373 y 407 m (Fig. 2) y se encuentra constituido por margas laminadas grises que se intercalan con niveles de calizas de 0,15 m de espesor promedio (Figs. 2 y 3A). En los últimos 7 m de la unidad (400 - 407 m), los niveles de calizas se tornan menos frecuentes, observándose un predominio marcado de margas (Fig. 2).

El tramo analizado de la Formación Quintuco se desarrolla entre los 407 y 463 m, y se encuentra conformado por pelitas calcáreas negras y laminadas, con intercalación de bancos carbonáticos (Fig. 2 y 3B) y delgados niveles de *beef-veins* (e.g., Rodríguez *et al.* 2009), de 1 cm de espesor promedio (Fig. 3C). La Formación Quintuco presenta 2 arreglos faciales característicos: el basal (407-439 m) compuesto por dolomías (Figs. 3C y 3D) y pelitas calcáreas laminadas (Fig. 3B) (Kietzmann *et al.* 2016; Scasso *et al.* 2017) y uno superior (439-463 m), constituido por calizas y pelitas laminadas (Fig. 2) (Kietzmann *et al.* 2016; Capelli *et al.* en prensa).

Gamma-Ray espectral

La sección superior de la Formación Vaca Muerta se encuentra caracterizada por valores bajos de *Gamma-Ray* total (Fig. 4). En concordancia, se observan bajos valores de K (< 2 %) y Th (< 12 ppm), mientras que el U presenta valores relativamente altos (> 6 ppm). Por encima se observa un cambio brusco en las mediciones de radioactividad, definiendo un intervalo de 35 m que aquí denominamos “intervalo de transición” (Fig. 4). El mismo presenta altos valores de *Gamma-Ray* total, cuya anomalía se explica por valores muy altos de K y Th, mientras que la contribución espectral del U decae marcadamente. Al analizar la contribución específica del U (autigénico vs detrítico) en el intervalo de transición, se observa como la contribución del mismo presenta esencialmente un origen detrítico, mientras que la contribución autigénica presenta valores muy

bajos, cercanos a cero. Esta tendencia en la contribución del U se invierte tanto por encima, como por debajo de dicho intervalo, donde la contribución significativa del U presenta un origen autigénico (Fig. 4). El intervalo de transición se corresponde con las pelitas menos calcáreas del techo de la Formación Vaca Muerta y con las margas y dolomías de la base de la Formación Quintuco (Fig. 2 y 4).

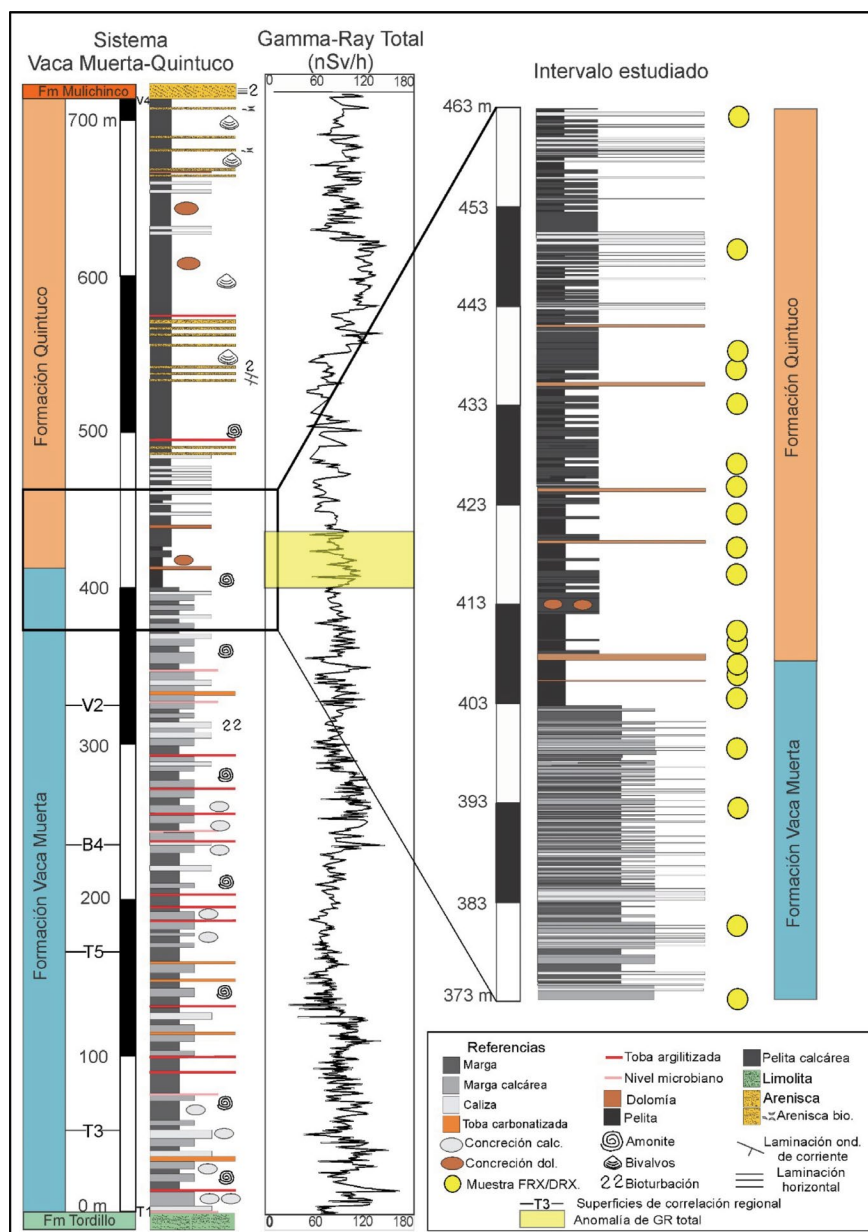


Figura 2. Perfil esquemático de las formaciones Vaca Muerta-Quintuco en el perfil de Puerta Curaco (Capelli *et al.* en prensa), con detalle en el intervalo de estudio del presente trabajo. Se muestra la posición de las muestras recolectadas para DRX y FRX y las superficies de correlación regional (T1, T3, B4, V2, V4) (Desjardins *et al.* 2016), posicionadas de manera aproximada.



Figura 3. A) Alternancia de calizas masivas (L) y margas calcáreas laminadas (Mc) en el tope de la Formación Vaca Muerta. B) Detalle de las pelitas calcáreas negras fuertemente laminadas (Fl) reconocidas en la transición entre ambas unidades. C) Fotografía general de la base de la Formación Quintuco, compuesta por una sucesión de pelitas calcáreas negras con fuerte laminación (Fl), desarrollo de beef-veins (B) e intercalaciones de dolomías (D) de color ocre a anaranjado. D) Detalle de una concreción dolomítica (D) marcando el contacto entre ambas unidades, los niveles de dolomías (D) se intercalan con pelitas calcáreas laminadas (Fl).

Geoquímica inorgánica

Como puede observarse en la figura 5 el Si, Al, K y Ti se incrementan marcadamente en el intervalo de transición. Por el contrario, la concentración de Ca que presenta valores altos relativos en la Formación Vaca Muerta ($> 10\%$) disminuye notoriamente en el intervalo de transición, restaurándose nuevamente por encima de dicho intervalo (Fig. 5). Al mismo tiempo, el intervalo de transición se encuentra enriquecido en Fe, respecto a las zonas sub y suprayacentes, alcanzando valores máximos de 3,2%. El S, al igual que el Ca, presenta una leve disminución en el intervalo de transición, registrando mínimos de 0,08% y máximos de 0,7 en las margas de la Formación Vaca Muerta (Fig. 5). Al observar la relación Fe/S (ver discusión), el enriquecimiento del Fe resulta aún más evidente, alcanzando valores muy altos (> 20) en el intervalo de transición, mientras que por encima y por debajo de este, los valores presentan un rango promedio de 4 a 5. Finalmente, el Mo muestra valores altos en el techo de la Formación Vaca Muerta, alcanzando las 42 ppm, mientras que el intervalo de transición se encuentra empobrecido en dicho elemento, con valores por debajo de las 15 partes por millón. Más aún, el intervalo comprendido entre los 423 y los 433 m presenta valores por debajo del límite de detección. Finalmente, por encima del intervalo de transición, los valores de Mo, no aumentan de manera significativa (Fig. 5).

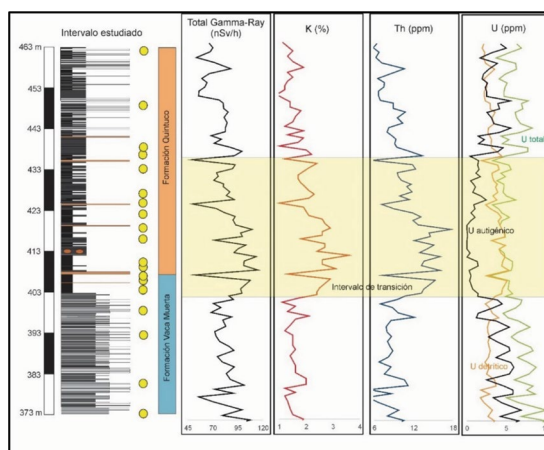


Figura 4. Respuesta total y espectral de *Gamma-Ray*, junto al cálculo de contribución de U (Wignall y Myers 1988).

El intervalo de transición se corresponde con una anomalía positiva en el *Gamma-Ray* total, asociada a altos valores de K y Th.

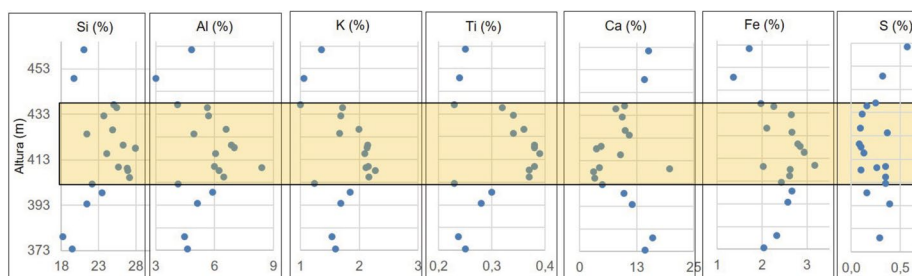


Figura 5. Respuesta geoquímica obtenida a partir de FRX en el intervalo de estudio. Se destaca el intervalo de transición entre ambas unidades, caracterizada por importantes quiebres en la distribución de los elementos.

Mineralogía

Los análisis de DRX indicaron que tanto las margas de la Formación Vaca Muerta como las pelitas calcáreas de la Formación Quintuco que se encuentran por encima y por debajo del intervalo de transición están formadas por cuarzo (31-58%), calcita (26-57%), plagioclasa (< 5%) y minerales de arcilla (< 12%) (Fig. 6). La misma mineralogía se reconoce en el intervalo de transición, aunque con mayor porcentaje de minerales de arcilla y cuarzo, que alcanzan valores máximos de 26 y 63% respectivamente. Como consecuencia, el intervalo de transición se encuentra empobrecido en calcita con porcentajes que varían entre un 10 y 43% (Fig. 6).

En el caso de los minerales de arcilla (fracción < 2 μ m), la Formación Vaca Muerta se encuentra constituida por interestratificados de illita-esmectita (I/S) con alto ordenamiento (R3) (*sensu* Moore y Reynolds 1997) y clorita como traza. Sin embargo, el intervalo de transición, enriquecida en minerales arcillosos, presenta illita e I/S, junto a una fuerte contribución de clorita. La notable asimetría que presenta el patrón de difracción de la clorita sugiere un enriquecimiento de Fe respecto

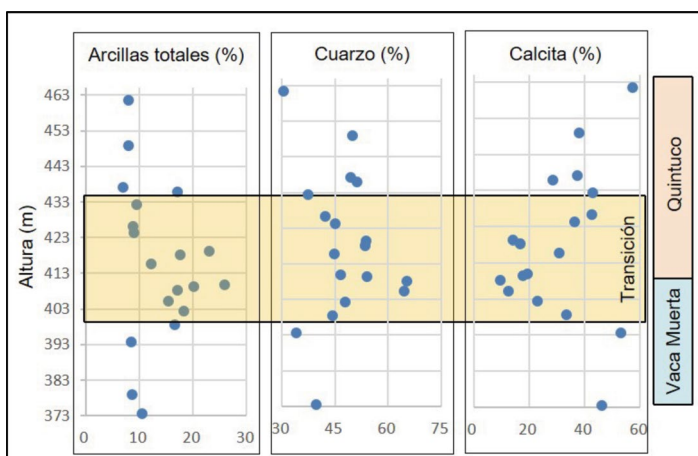


Figura 6. Abundancias relativas de minerales de arcilla, cuarzo y calcita en el perfil analizado. El intervalo de transición se encuentra enriquecido principalmente en arcillas y cuarzo, con una tendencia al decrecimiento en calcita.

a Mg (e.g., Moore y Reynolds 1997). La clorita observada en el intervalo de transición presenta marcada cristalinidad, cuando se la compara con la observada para la subyacente Formación Vaca Muerta. Por encima del intervalo de transición, las rocas vuelven a empobrecerse en minerales de arcilla, observándose, al igual que en la Formación Vaca Muerta, I/S y escasa clorita.

DISCUSIÓN

Integración de la información y caracterización del intervalo de transición

En la presente contribución se ha tomado como criterio preliminar para colocar el límite entre ambas unidades la dolomía inferior ubicado a 407 m (véase Fig. 2), pero resulta oportuno aclarar que en otros trabajos se posicionó el contacto en tramos más altos del perfil (ver D’Odorico 2009; Legarreta 2009). El perfil litoestratigráfico de los intervalos sub y suprayacentes al contacto entre las formaciones se encuentra caracterizado por una marcada homogeneidad litológica, siendo la principal diferencia macroscópica la aparición de dolomías en el intervalo de transición (Figs. 2, 3C, 3D). Respecto a las calizas sub y suprayacentes del mencionado intervalo, estudios petrográficos revelaron una mayor abundancia de partículas terrígenas en las calizas de la Formación Quintuco respecto a las de la Formación Vaca Muerta (Kietzmann *et al.* 2016; Capelli *et al.* en prensa).

Por la extensión regional que presentan las dolomías de la base de la Formación Quintuco, se interpreta que los mismos sugieren un cambio importante en la sedimentación dentro de la cuenca. De los modelos de dolomitización más comunes, aquí nos referiremos a los dos más probables: “*Hypersaline Lagoon and Reflux Model*” y el “*Mixed-water*” (Morrow 1990). El *Hypersaline Lagoon and Reflux Model*” (King 1947; Adams y Rhode 1960) resulta característico de ambientes marinos someros (Muller y Teitz 1971; Morrow 1990), y podría aplicarse a Formación Quintuco en

sectores más australes del área de estudio, para facies cercanas a la línea de costa (e.g., Yacimiento Lindero Atravesado, Olmos *et al.* 2002).

El segundo modelo, más apropiado para nuestro caso, se aplica a ambientes de transición-*offshore* y *offshore*, más similares a los definidos en Puerta Curaco (Kietzmann *et al.* 2016). El mismo propone la mezcla en subsuelo de agua marina y dulce (meteórica), elevada disponibilidad de Mg_2^+ y condiciones fisicoquímicas propicias para el desarrollo del proceso (Morrow 1990). En estos casos la dilución del sulfato (Kastner 1984), que se genera al producirse la mezcla de aguas, a relación constante de Mg/Ca, permite la precipitación de dolomita (ver Tucker 1991, 1993). Este mecanismo suele suceder en estadios de mar bajo, que permiten el paso de fluidos dolomitizantes a través del carbonato (Tucker 1993). Otro mecanismo propuesto para disminuir la cantidad de sulfato disuelto en las aguas porales es la reducción del sulfato por bacterias anaeróbicas, que permite la dolomitización en la zona de reducción de sulfatos y metanogénesis durante la diagénesis temprana (e.g., Friedman y Murata 1979; Baker y Burns 1985). Dicho mecanismo de dolomitización, también denominado “*Organogenic sea-floor model*” plantea que la dolomitización ocurre en ambientes ricos en materia orgánica a pocos metros por debajo del contacto agua/sedimento, ya que la principal fuente de Mg_2^+ es el agua marina a través de procesos de difusión (Baker y Burns 1985). Las dolomías del intervalo de transición presentan una señal isotópica que sugiere que al menos un porcentaje de la dolomitización se originó producto de metanogénesis bacteriana, acorde con el modelo de “poca dolomita” de Baker y Burns (Scasso *et al.* 2017). Dicho modelo ha sido empleado por dichos autores para explicar la dolomitización en niveles de la Formación Monterey (California) cuyo porcentaje de dolomita ronda el 3%, pudiendo alcanzar valores máximos del 20% (Burns y Baker 1987). Dichos valores resultan notablemente menores que los registrados en Puerta Curaco. Sin embargo, recientemente, ambos procesos en conjunto (metanogénesis y mezcla de aguas) han sido empleados para explicar el origen de bancos dolomíticos que alcanzan el 70-93% de dolomitización (Hoareau *et al.* 2009, 2015), valores similares a los que se registran en el intervalo de transición de Puerta Curaco (~85%, Scasso *et al.* 2017).

En general, los análisis de DRX de la columna estratigráfica analizada indican abundancia de I/S (R3) e illita, no reconociéndose feldespato potásico. Este mineral, muy común en sedimentos clásticos, habría estado presente en la sedimentación original, transformándose a plagioclasa (albita) durante la diagénesis (Land y Milliken 1981) y aportando el K necesario para el proceso de illitización sobre la esmectita (e.g., Hower *et al.* 1976). El intervalo de transición presenta un importante incremento en el *Gamma-Ray* total, asociado al K y Th (Fig. 4) que, en ausencia de feldespato potásico, sugiere que la anomalía es una respuesta al aumento de minerales arcillosos, típicamente illita (Cowan y Myers 1988). Dicho aumento se observa en los estudios de DRX (Fig. 6), que indican que el contenido arcilloso aumentó hasta dos veces, respecto a las subyacentes margas de la Formación Vaca Muerta. También, el aumento registrado en el contenido de Ti

(Fig. 5) se asocia a un aumento de los aluminosilicatos (Calvert y Pedersen 2007) y por ende a un aumento del aporte detrítico (Spalletti *et al.* 2014). La asimetría registrada en los patrones de DRX de la fracción arcillosa indica un enriquecimiento en Fe tanto en la illita como en la clorita, asociando el aumento de Fe del intervalo de transición (véase Fig. 5) al aumento de minerales arcillosos (véase Fig. 6).

Se interpreta que el aumento de Si, Al, K y Ti (Fig. 5) se corresponde con una mayor sedimentación detrítica (Calvert y Pedersen 2007; Dowey y Taylor 2017; Spalletti *et al.* 2014). Resulta oportuno aclarar que, si bien el Si puede presentar distintos orígenes (detrítico, biogénico o autigénico), la buena correlación que presenta con el Zr en la Formación Quintuco (R: 0.7) indica su origen detrítico, a diferencia de lo que ocurre para la Formación Vaca Muerta (R: 0.1) en donde el Si es mayormente de origen biogénico/autigénico (Capelli *et al.* en prensa).

El aumento de Fe observado en el intervalo de transición (Fig. 5) explica el marcado incremento en la relación Fe/S, elementos que conforman la pirita. El decrecimiento, aunque sutil, en el contenido de S sugiere una disminución en el contenido de pirita (probablemente presente en bajas concentraciones ya que no fue detectada por DRX). La misma precipita en la zona de reducción de sulfatos en forma de agregados framboidales de pequeño tamaño y en condiciones de importante acumulación de material orgánico (e.g., Berner y Raiswell 1983; Leventhal 1983). Los análisis de DRX realizados en la localidad de estudio para secciones basales de la Formación Vaca Muerta (fuera del intervalo analizado en este trabajo), enriquecidas en materia orgánica, han registrado la presencia de abundante pirita (Capelli *et al.* 2017a). En función del decaimiento en la curva de S, se propone entonces una disminución en el contenido de pirita en el intervalo de transición, lo que sugiere una disminución en el contenido orgánico.

Numerosos trabajos han vinculado la presencia de U con el contenido orgánico total (e.g., Wignall y Myers 1988). Normalmente, dichas variables se encuentran relacionadas, como producto de la precipitación de U en condiciones de anoxia ($U_{\text{autigénico}}$), condición propicia para generar la acumulación y preservación de materia orgánica. Wignall y Myers (1988) establecieron una relación $Th/U < 3$ para condiciones de anoxia, aunque dicho cutt-off ha sido discutido en numerosos trabajos, que sugieren a su vez el análisis de tendencias verticales en contraposición a valores absolutos (Lash y Blood 2014). En la sección estudiada, la curva obtenida a partir del *Gamma-Ray* muestra una disminución de U en el intervalo de transición, a diferencia de los aumentos en K y Th (véase Fig. 4). Dicha disminución, al igual que con el contenido de S, se explica por un menor contenido en el material orgánico, elemento necesario para fijar el U precipitado en condiciones reductoras (e.g., Wignall y Myers 1988). Por otro lado, el cambio registrado en la contribución del U (detrítico vs autigénico) (Fig. 4) podría sugerir mayor oxigenación y consecuente disminución en la precipitación de la fase autigénica. Sin embargo, la presencia continua de sedimentos muy bien laminados y el sutil decaimiento en los proxies de material orgánico no sugieren grandes cambios en las condiciones paleoredox, aunque sí una leve disminución en la cantidad de materia

orgánica. De la ecuación de Wignall y Myers (1988) para el cálculo del $U_{\text{autigénico}}$, se deduce que una elevada cantidad de Th generará una disminución notable en el cálculo de $U_{\text{autigénico}}$. Las bajas concentraciones de $U_{\text{autigénico}}$ en el intervalo de transición se explican entonces por un importante incremento en la cantidad de Th (pueden encontrarse hasta 30 ppm de Th en los minerales de arcilla, sensu Adams y Weaver 1958) coincidente con el aumento de minerales de arcilla en el intervalo de transición (Figs. 4, 5 y 6)

Por otro lado, el enriquecimiento en Mo ha sido usado en numerosas ocasiones como un proxy del potencial redox en facies ricas en materia orgánica, características de un ambiente marino de baja oxigenación (e.g., Meyers *et al.* 2005; Tribovillard *et al.* 2006; Spalletti *et al.* 2014). En nuestro caso, las correlaciones estratigráficas realizadas permiten concluir que la concentración de Mo en la localidad de Puerta Curaco guarda relación directa con el contenido orgánico total (Kietzmann *et al.* 2016; Eberli *et al.*, 2017). Todo esto, junto a la disminución observada en el U, denota una disminución sutil en el contenido de material orgánico, en respuesta posiblemente a un efecto de dilución de materia orgánica como consecuencia de la importante contribución detrítica que se registra en el intervalo de transición entre ambas unidades.

Implicación paleoambiental del intervalo de transición

Tanto la mineralogía como los proxies detríticos del intervalo de transición indican una significativa contribución silicoclástica hacia sectores depocentrales de la cuenca, registrándose un incremento considerable al compararlo con el intervalo analizado de la subyacente Formación Vaca Muerta. Dicho aporte clástico sería respuesta a un desplazamiento de los sistemas terrestres hacia porciones depocentrales, junto con la erosión de las plataformas, ambos vinculados a una regresión forzada. Dicho fenómeno se observa de manera regional en las líneas sísmicas por encima de la superficie V2, donde se reconoce la progradación de las facies de plataforma mixta encima de la rampa carbonática (Fig. 7). Esta geometría se observa en subsuelo 60 km al este del área de estudio (Fig. 7).

Así, la alta tasa de material detrítico (principalmente arcillas) dio lugar a la sedimentación de pelitas calcáreas, generando un efecto de dilución del material orgánico, aunque sin modificar significativamente las condiciones de anoxia. Asociado al descenso en el nivel del mar, se produjeron las condiciones necesarias para desencadenar la dolomitización masiva, característica del intervalo de transición. Un cambio similar de facies ha sido también observado en el bloque El Trapial, ubicado 60 km al este de área de estudio, donde los análisis sedimentológicos realizados en el intervalo estratigráfico equivalente permitieron la caracterización de facies de *offshore* compuestas por pelitas laminadas con intercalaciones de limolitas y areniscas muy finas y la presencia de dolomías, enriquecidas en terrígenos y minerales de arcillas (González Tomassini *et al.* 2014; Vallejo *et al.* 2016).

Si bien los depósitos de la Formación Quintuco en el área de estudio fueron interpretados como un ambiente de offshore a transición/offshore (Kietzmann *et al.* 2016), la gran abundancia de material detrítico reflejado en las elevadas tasas de sedimentación registradas por los mismos autores: 100-120 cm / 1000 años, podrían sugerir un ambiente de prodelta distal, asociado a la regresión forzada y explicando la mezcla de aguas necesarias para generar la dolomitización (ver Hoareau *et al.* 2015).

Finalmente, por encima del intervalo de transición, la litología, mineralogía y geoquímica de la Formación Quintuco presenta características muy similares a las descriptas para el tope de la Formación Vaca Muerta, sugiriendo que las condiciones de rampa carbonática se restablecieron transitoriamente previo al cambio definitivo a un sistema mixto silicoclástico-carbonático representado por la parte alta de la Formación Quintuco y la Formación Mulichinco (Sattler *et al.* 2016; Desjardins *et al.* 2016).

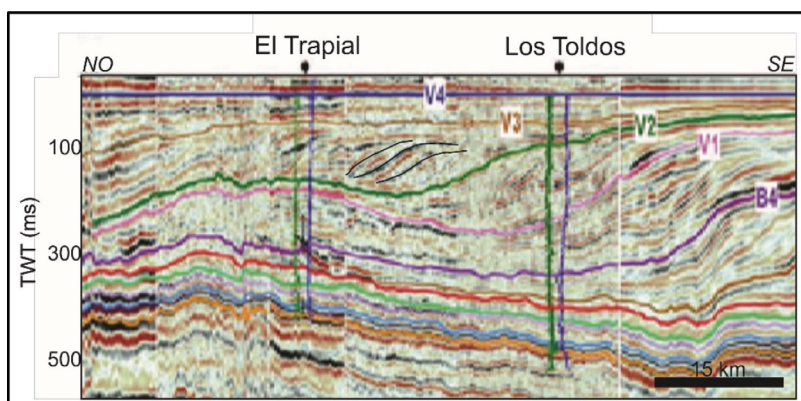


Figura 7. Sección de la transecta regional A-A' del sistema Vaca Muerta-Quintuco

La misma muestra que la sección V2-V4, que comprende el intervalo de transición en Puerta Curaco, presenta una fuerte progradación de las clinoformas, producto de un descenso en el nivel del mar, consistente con el aumento en el aporte silicoclástico y el progresivo desarrollo de un sistema progradacional mixto de la Formación Quintuco. El área de Puerta Curaco (no representado en la figura), se localiza aproximadamente 60 km al noroeste del bloque El Trapial.

CONCLUSIONES

Se caracterizó el intervalo de transición entre las formaciones Vaca Muerta y Quintuco mediante herramientas sedimentológicas y geoquímicas, permitiendo arribar a las siguientes conclusiones y propuestas:

- Se propone ubicar el límite entre las formaciones Vaca Muerta y Quintuco en el área de Puerta Curaco en la base de la dolomía, posicionado 407 m por encima de la base de la Formación Vaca Muerta y presentando una edad correspondiente al Berriasiano tardío-Valanginiense temprano.

-Dentro del perfil estratigráfico analizado en este trabajo, se desarrolla el intervalo de transición que abarca los últimos 7 m de la Formación Vaca Muerta y los 28 m basales de la Formación Quintuco. Dicho intervalo de transición se encuentra caracterizado por el predominio de pelitas calcáreas con dolomías intercaladas, siendo la relación pelita/dolomía 30:1.

-La dolomitización del intervalo de transición se asocia a dos procesos fundamentales: una primer etapa producto de metanogénesis bacteriana y otra posterior, producto de una mezcla de aguas meteóricas y marinas vinculada a una caída del nivel del mar.

-El espectro de *Gamma-Ray* en el intervalo de transición muestra un aumento marcado en las contribuciones de K y Th y un descenso significativo en la de U. En este intervalo también disminuye el $U_{\text{autigénico}}$.

-Los mismos minerales no arcillosos (cuarzo, plagioclasa y calcita) caracterizan a toda la columna. Sin embargo, se reconoce un aumento en el contenido de cuarzo en el intervalo de transición, que a su vez se enriquece en illita y clorita férrica respecto a la Formación Vaca Muerta. El aumento registrado en el contenido de minerales arcillosos explica el incremento en elementos de afinidad detrítica (Al, Ti, K, Fe, Th).

-El intervalo de transición representa un cambio en la sedimentación con un aumento en la contribución de partículas detríticas, generando un efecto de dilución (y disminución relativa) en el carbonato y en la materia orgánica, que se refleja en los menores valores de Mo y $U_{\text{autigénico}}$. No se detectaron cambios sustanciales en la oxigenación del fondo marino y las condiciones de baja oxigenación habrían sido similares a las de la Formación Vaca Muerta, hecho que se refleja en la ausencia de bioturbación y en la buena laminación de las rocas. Por ende, la dilución es la principal explicación para el decaimiento de los proxies de contenido orgánico.

-El abundante incremento de material detrítico, la dilución de la materia orgánica y la dolomitización se vinculan a una regresión forzada, representando en Puerta Curaco la primera evidencia de instauración de un sistema mixto de fuerte carácter progradacional de la Formación Quintuco por encima de los depósitos de rampa carbonática de la Formación Vaca Muerta.

AGRADECIMIENTOS

La presente contribución ha sido financiada por el CONICET y por el Consorcio Vaca Muerta (LOU 4900023748) integrado por la Universidad de Buenos Aires, Shell, Total y Chevron. Las sugerencias y comentarios de Ernesto Schwarz, Manuel Fantín, Silvia Barredo y un revisor anónimo mejoraron sustancialmente el manuscrito. Al mismo tiempo, nos gustaría extender los agradecimientos a los miembros de consorcio por permitir la publicación de los resultados, a Cecilia Genazzini, Martín Morosi y Jorge Maggi (CETMIC) por la ayuda brindada durante los análisis de DRX y a la familia Barros por permitirnos trabajar en sus tierras.

REFERENCIAS

- Adams, J.E. y M.G. Rhodes, 1960, "Dolomitization by seepage refluxion", AAPG Bulletin 44, p. 1912-1920.
- Adams, J.A. y C.E. Weaver, 1958, "Thorium to Uranium ratios as indicators of sedimentary processes: example of concept of geochemical facies", AAPG Bulletin 42, p. 387-430.
- Baker, P.A. y S. J. Burns, 1985, "Occurrence and Formation of Dolomite in organic-rich Continental Margin Sediments", AAPG Bulletin 69, p. 1917-1930.
- Berner, R. y R. Raiswell, 1983, "Burial of organic carbon and pyrite sulphur in sediments over Phanerozoic time: A new theory", *Geochim. Cosmochim. Acta* 47, p. 855-862.
- Burns, S.J. y P. Baker, 1987, "A Geochemical study of dolomite in the Monterey Formation, California", *Journal of Sedimentary Petrology* 57, p. 128-139.
- Calvert, S.E. y T.F. Pedersen, 2007, "Elemental proxies for paleoclimatic and palaeoceanographic variability in marine sediments: interpretation and applications", en: C. Hillaire-Marcel y A.D. Vernal (eds.), *Proxies in Late Cenozoic Paleooceanography*, Elsevier, Amsterdam 99, p. 567-644.
- Capelli, I., F. Cravero, D.A. Kietzmann y R.A. Scasso, 2017a, "Análisis mineralógico del sistema Vaca Muerta-Quintuco en un marco estratigráfico secuencial: sección Puerta Curaco, Cuenca Neuquina", XX Congreso Geológico Argentino-Simposio 5, p.16-19, San Miguel de Tucumán.
- Capelli, I.A., F. Cravero, D.A. Kietzmann y R.A. Scasso, 2017b, "Clay mineral analysis of the Vaca Muerta-Quintuco shale system, Northern Neuquén Basin, Argentina", 16° International Clay Conference, p. 119, Granada.
- Capelli, I.A., R. A. Scasso, D.A. Kietzmann, F. Cravero, D. Minisini y J.P. Catalano, 2018, "Mineralogical and geochemical trends of the Vaca Muerta-Quintuco Formations in Puerta Curaco, Neuquén Basin: Insights in their lithostratigraphic boundary", *Revista de la Asociación Geológica Argentina*.
- Carozzi, A.V., I.A. Orchuela y M.L. Rodríguez Schelotto, 1993, "Depositional models of the lower Cretaceous Quintuco-Loma Montosa Formation", *Journal of Petroleum Geology* 16, p. 421-450.
- Correia, G.G., L.V. Duarte, A. Pereira y R.L. Silva, 2012, "Outcrop gamma-ray spectrometry: Applications to the Sinemurian-Pliensbachian organic-rich facies of the Lusitanian Basin (Portugal)", *Journal of Iberian Geology* 38, p. 373-388.
- Cowan, D.R. y K.J. Myers, 1988, "Surface gamma ray logs: a correlation tool for frontier areas: discussion", AAPG Bulletin 72, p. 634-636.
- Crousse, L., S. Cuervo, D. Vallejo, L. Mosse, T. Discher, D. McCarty, 2015, "Unconventional Shale Pore System Characterization in El Trapial Area, Vaca Muerta, Argentina", *URTeC*, 2154603.
- Desjardins, P., M. Fantín, F. González Tomassini, H. Reijenstein, F. Sattler, F. Dominguez, D. Kietzmann, H. Leanza, A. Bande, S. Benoit, M. Borgnia, F. Vittore, T. Simo y D. Minisini, 2016, "Estratigrafía Sísmica Regional", En: G. González, M.D. Vallejo, D. Kietzmann, D. Marchal, P. Desjardins, F. González Tomassini, L. Gómez Rivarola, F. Domínguez, M. Fantín (eds.), *Transecta Regional de la Formación Vaca Muerta: integración de sísmica, registros de pozos, coronas y afloramientos*, Instituto Argentino del Gas y Petróleo: p. 5-22, Buenos Aires.

- D'Odorico, A.A., 2009, "Estratigrafía y petrología de la Fm. Vaca Muerta. Perfil de Puerta Curaco. Provincia del Neuquén", Trabajo Final de Licenciatura, Universidad de Buenos Aires, 159 pp. Inédito. Director: Roberto A. Scasso
- Domínguez, R.F., H. Reijenstein, G. Kohler, F. Sattler, M. Moreno, L. Gomez Rivarola y M. Borgia, 2017, "Distribución regional de quiebras de clinoformas de sistema Vaca Muerta-Quintuco", XX Congreso geológico argentino, p. 38-45, San Miguel de Tucumán.
- Dowey, P.J. y K.G. Taylor, 2017, "Extensive authigenic quartz overgrowths in the gas-bearing Haynesville-Bossier Shale, USA", *Sedimentary Geology* 356, p.15-25.
- Eberli, G.P., R. Weger, M. Tenaglia, L. Rueda, L. Rodríguez, M. Zeller, D. McNeill, S. Murray y P. Swart, 2017, "The Unconventional Play in the Neuquén Basin, Argentina-Insights From the Outcrop for the Subsurface", *UrTeC*: 2787581.
- Fantín M., L. Crousse, S. Cuervo, D. Vallejo, F. González Tomassini, H. Reijenstein y C. Lipinski, 2014, "Vaca Muerta Stratigraphy in central Neuquén Basin emergent unconventional project", *URTeC*, 1923793.
- Friedman, I. y K.J. Murata, 1979, "Origin of dolomite in Miocene Monterey Shale and related formations in the Temblor Range, California", *Geochimica et Cosmochimica Acta* Vol 43, p. 1357-1365.
- Groeber, P., 1946, "Observaciones geológicas a lo largo del meridiano 70°. 1. Hoja Chos Malal", *Revista de la Sociedad Geológica Argentina* 1, p. 177-208
- Gulisano, C.A., A. Gutiérrez Pleimling y R.E. Digregorio, 1984, "Esquema estratigráfico de la secuencia jurásica del oeste de la provincia del Neuquén", IX Congreso Geológico Argentino, Actas 1, p. 236-259, Buenos Aires.
- González Tomassini, F., Kietzmann, D.A., Fantín, M.A., Crousse, L.C. y H.M. Reijenstein, 2014, "Estratigrafía de la Formación Vaca Muerta en el área de El Trapial, Cuenca Neuquina, Argentina", IX Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, p. 587-611, Mendoza.
- Horeau, G., F. Odonne, E.J. Debroas, A. Maillard, C. Monnin y P. Callot, 2009, "Dolomite concretions on the Eocene Sobrarbe delta: fluid circulation above a submarine slide scar infilling", *Marine and Petroleum Geology* 26, p. 724-737.
- Hoareau, G., F. Odonne, D. Garcia, E. Debroas, C. Monnin, M. Dubois y J. Potdevin, 2015, "Burial diagenesis of the Eocene sobrarbe delta (Ainsa Basin, Spain) inferred from dolomitic concretions", *Journal of Sedimentary Research* 85, p. 1037-1057.
- Hower, J., E. V. Eslinger, M. E. Hower y E. A. Perry, 1976, "Mechanism of burial metamorphism of argillaceous sediment: 1. Mineralogical and chemical evidence", *Geological Society of America Bulletin* 87, p. 725-737.
- Kastner, M., 1984, "Control of dolomite formation", *Nature* 311, p. 410-411.
- Kietzmann, D.A., A.L., Ambrosio, J. Suriano, S. Alonso, V.V. Vennari, V.V., M.B. Aguirre-Urreta, G. Depine y D. Repol, 2014, "Análisis sedimentológico y estratigráfico secuencial de las Formaciones Vaca Muerta y Quintuco en el área de Chos Malal, Cuenca Neuquina", IX Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, p. 269-288, Mendoza.
- Kietzmann, D.A., R.M. Palma, A.C. Riccardi, J. Martín Chivelet y J. López-Gómez, 2014b, "Sedimentology and sequence stratigraphy of a Tithonian-Valanginian carbonate ramp (Vaca Muerta Formation): A misunderstood exceptional source rock in the Southern Mendoza area of the Neuquén Basin, Argentina", *Sedimentary Geology* 302, p. 64-86.

- Kietzmann, D.A., A.L., Ambrosio, J. Suriano, M.S. Alonso, F. González Tomassini, G. Depine y D. Repol, 2016a, "The Vaca Muerta-Quintuco system (Tithonian-Valanginian) in the Neuquén Basin, Argentina: a view from the outcrops in the Chos Malal fold and thrust belt", AAPG Bulletin 100, p. 743-741.
- Kietzmann, D.A., A.L., Ambrosio, M.S. Alonso y J. Suriano, 2016b, "Capítulo 20: Puerta Curaco", en: G. González, M.D Vallejo, D. Kietzmann, D. Marchal, P. Desjardins, F. González Tomassini, L. Gómez Rivarola, F. Domínguez, M. Fantín (eds.), Transecta Regional de la Formación Vaca Muerta: integración de sísmica, registros de pozos, coronas y afloramientos, Instituto Argentino del Gas y Petróleo, p. 219-232, Buenos Aires.
- King, R.H., 1947, "Sedimentation in Permian Castile Sea", AAPG Bulletin 31, p. 470-477
- Kozłowski, E., C. Cruz y C. Sylwan, 1996, "Geología Estructural de la Zona de Chos Malal. Cuenca Neuquina, Argentina", 13° Congreso Geológico Argentino, Actas I, p.15-26, Buenos Aires.
- Land L.S. y K.L. Milliken, 1981, "Feldspar diagenesis in Frio Formation, Brazoria County, Texas. Gulf Coast", Geology 9, p. 314-318.
- Lash, G.G. y D.R. Blood, 2014, "Organic matter accumulation, redox and diagenetic history of the Marcellus Formation, southwestern Pennsylvania, Appalachian Basin", Marine and Petroleum Geology 57, p. 244-263.
- Leanza, H.A., 2009, "Las principales discordancias del Mesozoico de la Cuenca Neuquina según observaciones de superficie", Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales 11, p. 145- 184.
- Leanza, H.A. y C.A. Hugo, 1977, "Sucesión de amonites y edad de la Formación Vaca Muerta y sincrónicas entre los Paralelos 35° y 40° l.s. Cuenca Neuquina-Mendocina", Revista de la Asociación Geológica Argentina 32, p. 248-264.
- Legarreta, P.N., 2009, "Formación Mulichinco en el perfil Puerta Curaco: secuencias, facies y evolución paleoambiental. Cuenca Neuquina, provincia del Neuquén, Argentina" Trabajo Final de Licenciatura, Universidad de Buenos Aires, 200 pp. Inédito. Director: Roberto A. Scasso.
- Legarreta, L. y C. Gulisano, 1989, "Análisis estratigráfico secuencial de la Cuenca Neuquina (Triásico Superior - Terciario Inferior), Argentina", en G.A. Chebli y L.A. Spalletti (eds.), Cuencas Sedimentarias Argentinas. Serie Correlación Geológica 6, p. 221-243. San Miguel de Tucumán.
- Legarreta, L. y M.A. Uliana, 1991, "Jurassic-Cretaceous Marine Oscillations and Geometry of Back Arc Basin, Central Argentina Andes", en: D.I.M. McDonald (ed.), Sea level changes at active plate margins: Process and product. IAS Special Publication 12, p. 429-450.
- Leventhal, J.S., 1983, "An interpretation of carbon and sulphur relationships in Black Sea sediments as indicators of environments of deposition", Geochim. Cosmochim. Acta 47, p. 133-138
- Lucci, L. y D. Lazo, 2012, "The genus Steinmanella Crickmay (Bilvalvia) in the transition between Vaca Muerta and Mulichinco Formations, early Valanginian, Neuquén Basin, Argentina", Ameghiniana 49, p. 96-117.
- Meissinger, V. y G. Lo Forte, 2014, "el shale desde el punto de vista diagenético: el aporte volcánico en la diagénesis temprana de la Formación Vaca Muerta", IX Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, p. 403-426.
- Meyers, S.R., B.B. Sageman y T.W. Lyons, 2005, "Organic carbon burial rate and the molybdenum proxy: theoretical framework and application to Cenomanian-Turonian oceanic event 2", Pale-oceanography 20, PA2002.

- Mitchum, R.M. y A. Uliana, 1985, "Seismic stratigraphy of carbonate depositional sequences, Upper Jurassic-Lower Cretaceous. Neuquén Basin, Argentina" en: R.B. Berg y D.G. Woolverton (eds.), *Seismic stratigraphy: An integrated approach to hydrocarbon exploration*. AAPG Memoir 39, p. 255-274.
- Montero-Serrano, J.C., K.B. Föllmi, T. Adatte, J.E. Spangenberg, N. Tribovillard, A. Fantasia y G. Suan, 2015, "Continental weathering and redox conditions during the early Toarcian Oceanic Anoxic Event in the northwestern Tethys: Insight from the Posidonia Shale section in the Swiss Jura Mountains", *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology* 429, p. 83-99.
- Moore, D.M. y R.C. Reynolds, 1997, "X-Ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals". Oxford University Press, 378 p., New York.
- Morrow, D.W., 1990, "Dolomite-Part 2: Dolomitization Models and Ancient Dolostones", en: I.A. McIlreath y D.W. Morrow (eds.), *Diagenesis*. Geological Association of Canada, p. 125-139.
- Muller, S. y G. Teitz, 1971, "Dolomite replacing "cement A" in biocalcarenes from Fuerteventura, Canary Islands, Spain", en: D.P. Bricker (ed.), *Carbonate Cements*. John Hopkins Press, Baltimore: 376 p.
- Olmos, M., H. Maretto, D. Lasalle, O. Carbone, y C. Naidés, 2002, "Los reservorios de la Formación Quintuco", en: M. Schiuma, G. Hinterwimmer y G. Vergani, G. (eds.), *Rocas reservorio de las cuencas productivas argentinas*. IAPG, V Congreso de exploración y desarrollo de hidrocarburos, p. 359-382, Mar del Plata.
- Repol, D., P. Desjardins, P. Buenafama, L. Xu, G. Depine, M. Thompson, F. Rucci, J. Veldkamp y P. Smith, 2014, "Vaca Muerta Liquid-rich shale: key properties and insights towards a predictive geological model, Sierras Blancas Block, Neuquen Basin", IX Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, p. 567-586, Mendoza.
- Rodriguez, M., P.R. Cobbold, H. Loseth y G. Ruffet, 2009, "Widespread bedding-parallel veins of fibrous calcite ("beef") in a mature source rock (Vaca Muerta Fm, Neuquén Basin, Argentina): evidence for overpressure and horizontal compression", *Journal of the Geological Society of London* 166(4), p. 695-709.
- Sagasti, G. A. Ortiz, D. Hryb, M. Foster y V. Lazzari, 2014, "Understading Geological Heterogeneity to Customize Field development: An example from the Vaca Muerta Unconventional Play, Argentina", *URTeC*, 1923357.
- Sattler, F., R.F. Dominguez, M. Fantín, P. Desjardins, H. Reijenstein, S. Benoit, M. Borgnia, F. González Tomassini, F. Vittore, E. Feinstein, D. Kietzmann y D. Marchal, 2016, "Anexo 1", En: G. González, M.D Vallejo, D. Kietzmann, D. Marchal, P. Desjardins, F. González Tomassini, L. Gómez Rivarola, F. Domínguez, M. Fantín (eds.), *Transecta Regional de la Formación Vaca Muerta: integración de sísmica, registros de pozos, coronas y afloramientos*, Instituto Argentino del Gas y Petróleo: Anexo I, Buenos Aires.
- Scasso, R.A., M.S. Alonso, S. Lanés, H.J. Villar y H. Lippai, 2002, "Petrología y geoquímica de una ritmita marga-caliza del hemisferio Austral: EL Miembro Los Catutos (Formación Vaca Muerta), Tithoniano medio de la Cuenca Neuquina", *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 57, p. 143-159.

- Scasso, R.A., K. Follmi, J. Spaghenberg, I.A. Capelli, J.P. Catalano, F. Cravero y D.A. Kietzmann, 2017, "Concreciones dolomíticas de la Formación Quintuco en la localidad de Puerta Curaco, Cuenca Neuquina, Argentina", 20° Congreso Geológico Argentino, Simposio 5, p. 146-147, San Miguel de Tucumán.
- Schiuma, M., G. Vergani y G. Hinterwimmer, 2002, "Rocas reservorios de las cuencas productivas argentinas", 5° Congreso de exploración y desarrollo de Hidrocarburos, p. 790, Mar del Plata.
- Schwarz, E., L.A. Spalletti y G. Veiga, 2011, "La Formación Mulichinco (Cretácico temprano) en la Cuenca Neuquina", Relatorio del XVIII Congreso Geológico Argentino, p. 131-144, Neuquén.
- Spalletti, L. y G.D. Veiga, 2007, "Variability of continental depositional systems during lowstand sedimentation: an example from the Kimmeridgian of the Neuquén Basin, Argentina", *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis* 14, p. 85-104.
- Spalletti, L.A., J.R. Franzese, S.D. Matheos y E. Schwarz, 2000, "Sequence stratigraphy of a tidally dominated carbonate-siliciclastic ramp; the Tithonian-Early Berriasian of the Southern Neuquén Basin, Argentina", *Geological Society London Special Publications* 157, p. 433-446, London.
- Spalletti, L.A., E. Schwarz y G.D. Veiga, 2014, "Geoquímica inorgánica como indicador de procedencia y ambiente sedimentario en sucesiones de lutitas negras: los depósitos transgresivos titonianos (Formación Vaca Muerta) de la Cuenca Neuquina", *Andean Geology* 41, p. 401-435.
- Stinco, L. y A. Mosquera, 2005. Estimación del contenido total de carbono orgánico a partir de registros de pozo para las Formaciones Vaca Muerta y Los Molles, Cuenca Neuquina, Argentina. *Boletín de Informaciones Petroleras*. Año I, p.18-30.
- Tribovillard, N., T.J. Algeo, T.W. Lyons y A. Ribouleau, 2006 "Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: an update", *Chemical Geology* 232, p. 17-32.
- Tucker, M.E., 1991, "Sedimentary petrology: an introduction to the origin of sedimentary rocks, Second edition", *Geoscience Texts*, p. 260.
- Tucker, M.E., 1993, "Carbonate diagenesis and sequence stratigraphy", en: V.P. Wright (ed.), *Sedimentology review* 1, Wiley-Blackwell p. 51-72.
- Uliana, M.A., L. Legarreta, G.A. Laffitte y H.J. Villar, 2014, "Estratigrafía y geoquímica de las facies generadoras de hidrocarburos en las cuencas petrolíferas de Argentina", IX Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, p. 3-92, Mendoza.
- Vallejo, M.J., F. Gonzales Tomassini, M. Fantín, H. Reijenstein, S. Cuervo y L. Crousse, 2016," Capítulo 19: El Trapial", en: G. González, M.D Vallejo, D. Kietzmann, D. Marchal, P. Desjardins, F. González Tomassini, L. Gómez Rivarola, F. Domínguez, M. Fantín (eds.), *Transecta Regional de la Formación Vaca Muerta: integración de sísmica, registros de pozos, coronas y afloramientos*, Instituto Argentino del Gas y Petróleo, p. 205-218, Buenos Aires.
- Weaver, C., 1931, "Paleontology of the Jurassic and Cretaceous of west central Argentina", *Memoir University Washington* 1, p. 1-469. Seattle.
- Weger, R., L. Rodriguez Blanco y G. Eberli, 2017a, "A basal reference section and lateral variability of the Vaca Muerta Formation in the Neuquén Basin, Argentina", XX Congreso Geológico Argentino-Simposio 5, p.179-184, San Miguel de Tucumán.

- Weger, R., S. Murray y D. McNeill, 2017b, "Clumped isotope paleothermometry of calcite beef in the Vaca Muerta Formation, Neuquén Basin", XX Congreso Geológico Argentino-Simposio 5, p.185-190, San Miguel de Tucumán.
- Wignall, P.B. y K.J. Myers, 1988, "Interpreting benthic oxygen levels in mudrocks: A new approach". *Geology* 16, p. 452-455.
- Xu, G., J.F. Deconinck, Q. Feng, F. Baudin, P. Pellenard, J. Shen y L. Bruneau, 2017, "Clay mineralogical characteristics and the Permian-Triassic Shangai section and their paleoenvironmental and/or paleoclimatic significance", *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology* 474, p. 152-163



**10° CONGRESO DE
EXPLORACIÓN Y
DESARROLLO DE
HIDROCARBUROS**

**Energía y Sociedad
aliados inseparables
Mendoza 2018**