

VARIACIONES DE FACIES DE LAS SECUENCIAS BASALES DE LA FORMACIÓN VACA MUERTA EN SU LOCALIDAD TIPO (SIERRA DE LA VACA MUERTA), CUENCA NEUQUINA

Diego A. Kietzmann^{1,2}, Alfredo L. Ambrosio^{1,4}, Julieta Suriano^{1,3}, Susana Alonso^{1,3}, Verónica V. Vennari^{1,2},
María Beatriz Aguirre-Urreta^{1,2}, Gabriela Depine⁵, David Repol⁵

1: Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Ciencias Geológicas.

2: Instituto de Estudios Andinos Don Pablo Groeber (IDEAN) – CONICET. diegokietzmann@gl.fcen.uba.ar,
vvennari@gl.fcen.uba.ar, aguirre@gl.fcen.uba.ar

3: Inst. de Geociencias Básicas, Ambientes y Aplicadas (IGEBA). julietasuriano@yahoo.com.ar, sualonso@gl.fcen.uba.ar

4: Geoandina SRL. alfredo.ambrosio@geo-andina.com

5: Shell Exploration and Production Company, Houston. TX. gabriela.depine@shell.com, david.repol@shell.com

Palabras clave: análisis de facies, ciclos transgresivo-regresivos, ramps carbonática, Formación Vaca Muerta

ABSTRACT

Facies variation in basal sequences of the Vaca Muerta Formation at its type locality (Sierra de la Vaca Muerta), Neuquén Basin

The Vaca Muerta-Quintuco system (early Tithonian – early Valanginian) is a broad shallowing-upward sedimentary cycle consisting of dark bituminous shales, marls, limestones, and sandstones, cropping out in the Neuquén Basin, west-central Argentina. This paper analyzes five sections of the three first depositional sequences in Sierra de la Vaca Muerta, Neuquén province. Detailed facies analysis allows differentiating five facies associations, representing basinal to shoreface facies of a mixed carbonate/siliciclastic shelf system (Lower Vaca Muerta Formation), and basinal to inner ramp facies of a homoclinal carbonate ramp system (Los Catutos Member), prograding northwestward from the southeastern margin of the basin. These results are useful as analogs in nearby areas, since the projections of shelf breaks mapped by Mitchum and Uliana end perpendicular to the area of study.

INTRODUCCIÓN

En este trabajo se presenta un análisis sedimentológico y estratigráfico secuencial de las secuencias basales de la Formación Vaca Muerta comprendidas entre las Zonas de *Virgatospinctes mendozanus* (Tithoniano inferior alto) y *Windhausenicerias internispinosum* (Tithoniano superior bajo). Las mismas fueron estudiadas a lo largo de una transecta S-N conformada por cinco secciones estratigráficas aflorantes en la Sierra de la Vaca Muerta (Figura 1).

Desde un punto de vista litoestratigráfico, Weaver (1931) dividió el intervalo Tithoniano –

Valanginiano inferior en dos unidades formacionales, denominando Formación Vaca Muerta a un conjunto de pelitas negras, calizas y areniscas de edad tithoniana, y Formación Quintuco, a un conjunto de pelitas grises con intercalaciones de areniscas y calizas de edad berriasiana-valanginiana (Figura 2). Leanza (1972) enmendó la definición original de la Formación Vaca Muerta incluyendo en ella a la Formación Quintuco y, posteriormente Leanza (1973) propuso la denominación de Formación Picún Leufú para denominar a un conjunto de areniscas calcáreas y calizas bioclasticas de edad tithoniana medio-tardía, que habían sido incluidas dentro de la Formación Quintuco por Weaver (1931). Asimismo, Leanza *et al.* (1977) definieron la Formación Carrín Cura para designar un conjunto de areniscas verdosas de edad tithoniana que se encuentran entre la Formación Picún Leufú y la Formación Quebrada del Sapo en el margen sureste de la cuenca. Sin embargo, el término de Formación Quintuco perduró en la industria para denominar a un conjunto de calizas bioclásticas y oolíticas, calcarenitas y dolomías de plataforma que representan las

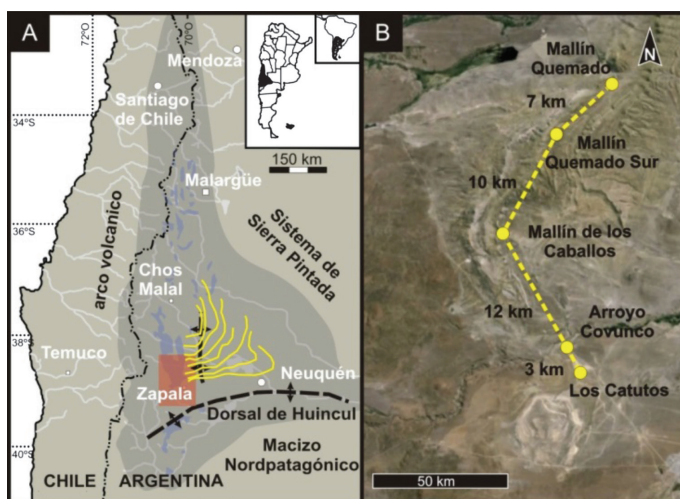


Figura 1. A) Ubicación del área de estudio. En azul se muestran los afloramientos del Grupo Mendoza (tomado de Leanza *et al.* 1977), y en amarillo los quiebres de plataforma de Mitchum y Uliana (1985). B) Ubicación de las secciones estratigráficas levantadas a lo largo de la Sierra de la Vaca Muerta.

Edad	Ciclos/ Secuencias		Litoestratigrafía		Ambiente sedimentario
Barremiano	Ándico (parcial)	Mesosecuencia Mendoza	Grupo Mendoza		
Hauteriviano				Fm. Agrio	rampa mixta
Valanginiano				Fm. Mulichinco	shoreface
Berriasiano				Fm. Picún Leufú/Quintuco	shoreface/trans.
Tithoniano				Fm. Vaca Muerta Mb.LC	rampa interna a cuenca

Figura 2. Cuadro estratigráfico de la Mesosecuencia Mendoza en el área de la Sierra de la Vaca Muerta.

facies más someras del sistema depositacional (*e.g.*, Mitchum y Uliana 1985, Legarreta y Gulisano 1989, Legarreta y Uliana 1991, 1996, Carozzi *et al.* 1993.), por lo que Leanza *et al.* (2011) mantuvieron el término de Formación Quintuco s.s. para la unidad original de Weaver (1931) y Formación Quintuco para la unidad de subsuelo.

Finalmente, Leanza y Zeiss (1990, 1992, 1994) definieron en la Sierra de la Vaca Muerta el Miembro Los Catutos de la Formación Vaca Muerta para denominar un intervalo de calizas litográficas del Tithoniano medio alto y superior bajo (Zonas de *Aulacosphinctes proximus* y *Windhauseniceras internispinosum*), que desde un punto de vista genético representa una progradación de la Formación Quintuco (*e.g.*, Gulisano *et al.* 1984).

En el área de estudio existen escasos trabajos publicados referentes a la sedimentología y las secuenciales depositacionales. Entre ellos, los trabajos de Gulisano *et al.* (1984) y Mitchum y Uliana (1985) permitieron conocer con impresionante precisión la arquitectura de este intervalo en afloramiento y subsuelo.

Asimismo, Scasso *et al.* (2002, 2005) dieron a conocer los primeros estudios sedimentológicos y geoquímicos del Miembro Los Catutos en las canteras de Los Catutos, el que interpretaron como acumulaciones en forma de amplios abultamientos carbonáticos de baja pendiente en facies de rampa externa.

El objetivo principal de este trabajo es contribuir a la comprensión de la dinámica depositacional, así como las variaciones verticales y laterales de facies en esta área de la faja plegada. Si bien esta información no puede ser trasladada directamente al subsuelo, es importante destacar que los quiebres de plataforma de las primeras secuencias depositacionales mapeadas por Mitchum y Uliana (1985) pueden proyectarse hasta terminar perpendicularmente al área de estudio, por lo que estos resultados sirven para extrapolar como análogos en áreas cercanas de subsuelo.

ÁREA DE ESTUDIO Y METODOLOGÍA

A lo largo de la Sierra de la Vaca Muerta se levantaron cinco perfiles estratigráficos del Miembro Inferior y el Miembro Los Catutos de la Formación Vaca Muerta, que de sur a norte corresponden a las secciones Los Catutos, Arroyo Covunco, Mallín de los Caballos, Mallín Quemado Sur y Mallín Quemado (Figura 1).

El contacto basal de la Formación Vaca Muerta en esta área es concordante con las facies fluviales de la Formación Tordillo, en tanto que el contacto superior consiste en un pasaje transicional a la Formación Quintuco/Picún Leufú. Este pase se reconoce por observarse una mayor frecuencia en la aparición de bancos arenosos portadores de abundante fauna invertebrados, típica de ambientes marino someros.

Para el estudio descriptivo de la Formación Vaca Muerta se definieron litofacies (procesos

sedimentarios), facies (subambientes) y asociaciones de facies (ambientes sedimentarios), de acuerdo con las características litológicas, texturales, estructuras sedimentarias, geometría, contactos, contenido fósil y aspectos tafonómicos observados. Las descripciones texturales fueron reforzadas mediante el estudio de alrededor de 90 láminas delgadas.

Aquí se utiliza el código de facies para rocas carbonáticas propuesto por Kietzmann y Palma (2011) y Kietzmann *et al.* (2014), que consiste en tres términos: el primero se refiere a la textura (rocas carbonáticas en *itálica*), el segundo a los componentes principales (como subíndice), y el tercero hace referencia a las estructuras sedimentarias (Cuadro 1). Las secuencias depositacionales fueron definidas a partir del patrón de apilamiento y el reconocimiento de superficies de inundación siguiendo la metodología empleada por Kietzmann *et al.* (2014).

ANÁLISIS SEDIMENTOLÓGICO

En el área de la Sierra de la Vaca Muerta se reconocieron 14 litofacies que fueron agrupadas en 5 facies y 2 asociaciones de facies. Un resumen de su distribución se muestra en el cuadro 1.

Facies 1 (cuenca)

Descripción

La facies 1 consiste en la alternancia rítmica de pelitas negras y arenitas muy finas laminadas ricas en materia orgánica (Fl, Sh). Los bancos son tabulares y lateralmente muy continuos, con espesores de 5 a 70 cm. Las pelitas negras (Fl) contienen abundantes escamas de peces, amonites y ostras, que se disponen paralelos a la laminación. Las arenitas finas (Sh) contienen en algunos casos turboglifos y marcas de arrastre (Figura 3). De manera claramente subordinada aparecen bancos de calizas micríticas, incluyendo *wackestones* radiolaríticos laminados (W_rh) y *packstones* intraclásticos laminados (P_ih). No se observa bioturbación.

En esta facies es común la presencia de concreciones formadas durante la diagénesis temprana, que se alinean en niveles continuos. En algunos casos contiene cristales pseudomórficos de hematita según pirita, de hábito cúbico o en agregados esféricos.

La facies 1 está presente en la base de las secciones estratigráficas Mallín Quemado, Mallín Quemado Sur y Mallín de los Caballos.

Interpretación

La granulometría fina, la excelente laminación y la buena preservación de la fauna permiten interpretar a las pelitas negras (Fl) como producto de sedimentación por decantación en sectores de

baja energía. La presencia de arenitas finas laminadas con marcas de base (Sh) sugiere depositación a partir de flujos tipo turbidíticos. La ausencia de actividad bentónica, el alto contenido de materia orgánica y la abundante preservación de partículas fosfáticas indican que las condiciones de la columna de agua eran deficientes en oxígeno, probablemente disóxicas. La tasa de sedimentación era moderada a baja (~10 m/Ma), suficiente como para favorecer la preservación de la materia orgánica sin diluirla.

Se interpreta que la facies 1 se depositó por debajo del nivel normal de olas de tormenta, en condiciones restringidas en oxigenación.

				FACIES				
				1: cuenca	2: zona de transición	3: Zona de transición - shoreface	4: rampa externa	5: rampa interna
FACIES	alta energía	Packstones peloidales masivos	P_{pm}				MR	
		Packstones/grainstones masivos	PG_{pm}					MR
		Packstones intraclásticos laminados	P_h	S				
		Rudstones bioclasticos gradados	R_{bg}				S	
		Packstones/grainstones con estratificación entrecruzada	PG_{pp}					R
		Grainstones oolíticos con estratificación entruzada	G_{op}					S
		Packstones/grainstones con laminación heterolítica	PG_{pht}					MR
		Areniscas con estratificación entrecruzada sigmoidal	Sp					S
		Areniscas con HCS	$Shcs$		MR			
		Areniscas con laminación ondulítica de corriente	Sr			R		
		Areniscas con laminación horizontal	Sh	R	MR	MR		
	baja energía	Bindstones microbianos	B_{ml}				S	
		Wackestones laminados	W_{lh}	S				
		Margas laminadas	Mrh			S	MR	R
		Pelitas laminadas	Fl	MR	MR	MR		
		Tobas laminadas	Tm		S			

Cuadro 1. Facies y litofacies en el área de la Sierra de la Vaca Muerta. Referencias: (MR) facies más representativas, (R) facies representativas, (S) facies subordinadas.

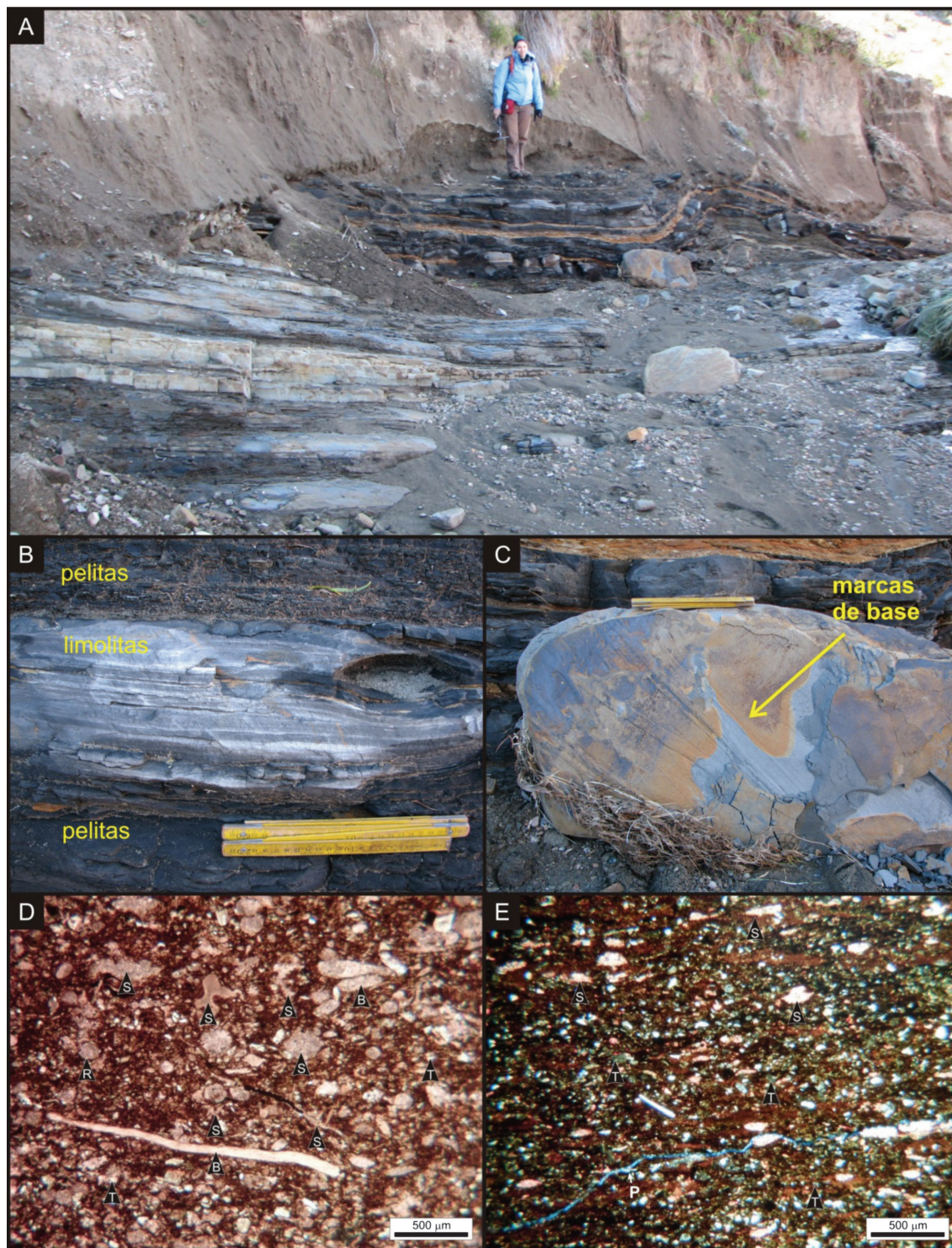


Figura 3. A) Facies de cuenca (facies 1) en la sección Mallín de los Caballos, donde se observa un patrón de apilamiento claramente transgresivo. B-C) Detalle de las limolitas y areniscas finas originadas a partir de flujos tipo turbidíticos. D) Limolitas bioclásticas con abundantes restos de microcrinoideos saccocómidos en la sección Mallín Quemado. E) Limolitas con abundante laminación microbiana en la sección Mallín de los Caballos.

Facies 2 (zona de transición)

Descripción

La facies 2 consiste en una alternancia de limolitas a arenitas calcáreas laminadas (Sh), arenitas calcáreas con estratificación entrecruzada *hummocky* (Shcs), pelitas calcáreas grises (Fl) y tobas (Tm). Ocasionalmente aparecen concreciones formadas durante la diagénesis temprana de hasta 1,5 m de longitud, que preservan las estructuras sedimentarias primarias (Figura 4).

Las limolitas calcáreas laminadas son similares a las de la facies 1, aunque se intercalan con pelitas grises. Son tabulares, con límites netos y espesores de 5 a 20 cm. El contenido bioclástico es menor, pero también contienen fragmentos de ostras y amonites. Algunos niveles contienen fragmentos de troncos de 5 a 10 cm de longitud.

Las areniscas calcáreas con estratificación entrecruzada *hummocky* son finas a medias y forman ciclos granodecrecientes de 20 a 30 cm de espesor, donde se pueden reconocer los 4 intervalos típicos de depósitos de tormenta (ver Kietzmann y Palma 2011). Se inician con una base bioclástica de 1 a 4 cm, con abundantes bivalvos e intraclastos. El siguiente intervalo está constituido por areniscas con estratificación entrecruzada *hummocky*, que presentan longitudes de onda de 1 a 1,5 metros. El tercer intervalo consiste en areniscas finas con laminación de bajo ángulo, mientras que el último intervalo está caracterizado por sets de laminación ondulítica de corriente (Figura 4).

La facies 2 está presente en las secciones Los Catutos, Arroyo Covunco y Mallín de los Caballos.

Interpretación

Las características de las limolitas laminadas sugieren condiciones de energía moderada a alta relacionada con depositación por tormentas. En efecto, los depósitos con estratificación entrecruzada *hummocky* se interpretan como depósitos de *hummocky* acrecionales generados a partir de flujos oscilatorios con una reducida componente unidireccional, asociados a oleaje de tormentas. Los *lags* bioclástico/intraclásticos reflejan la fase de mayor energía de la tormenta mientras que los sets con HCS y laminación de bajo ángulo reflejan el decrecimiento paulatino del oleaje hasta la depositación de pelita durante la fase post-tormenta. Las dimensiones de las estructuras sugieren que la depositación ocurrió por encima del nivel normal de olas de tormenta.

Los depósitos de tobas masivas o gradadas se interpretan como depósitos piroclásticos de caída. La ausencia de estructuras tractivas, participación de bioclastos y marcas de base, sugiere un origen primario de estos depósitos.

La facies 2 se interpreta como depósitos originados por encima del nivel normal de olas de tormenta y por debajo del nivel de olas de buen tiempo, en un ambiente pobremente oxigenado correspondiente al sector de la zona de transición.

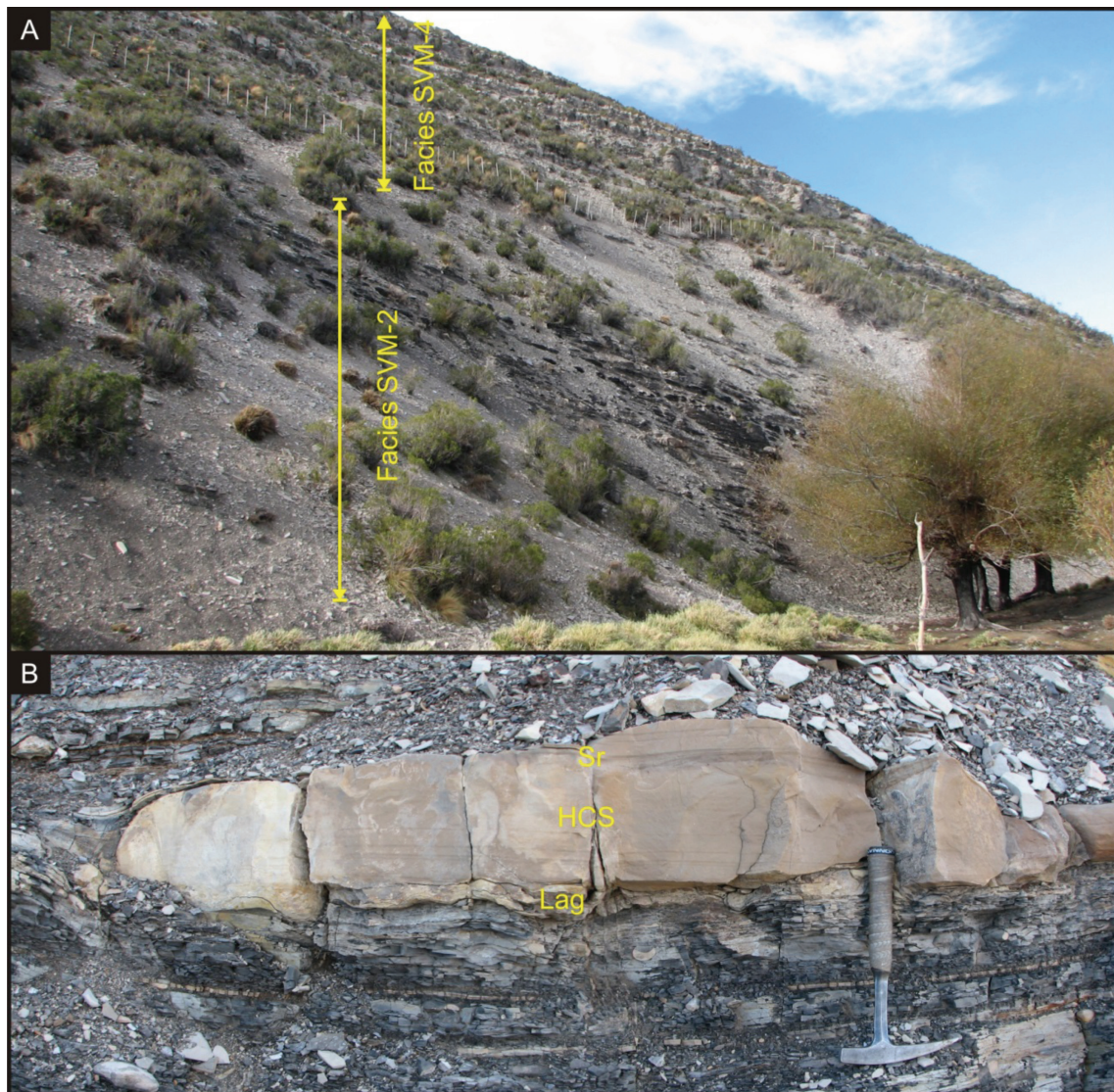


Figura 4. A) Aspecto general de la facies 2 (zona de transición) en la sección Mallín de los Caballos. B) Alternancia de pelitas calcáreas grises (Fl), limolitas a arenitas calcáreas laminadas (Sh) y arenitas calcáreas con estratificación entrecruzada *hummocky* (Shcs). Estas últimas quedan preservadas en concreciones formadas durante la diagénesis temprana, evidenciando un serio problema de preservación de las estructuras sedimentarias primarias que dificulta las interpretaciones paleoambientales.

Facies 3 (Zona de transición a shoreface inferior?)

Descripción

La facies 3 consiste en una alternancia de areniscas finas a limolitas calcáreas laminadas (Sh) con pelitas grises (Fl) y en menor medida margas poco calcáreas (Mrh). Las limolitas calcáreas laminadas son tabulares, con límites netos y espesores de 5 a 20 cm de potencia. Contienen abundantes fragmentos de ostras y amonites. Microscópicamente consisten en una matriz limolítica compuesta por cuarzo, plagioclasa, micas y en menor medida fango calcáreo. Contiene fragmen-

tos de ostras dispuestas de forma caótica, clastos de plagioclasa y cuarzo tamaño arena media.

Las pelitas y margas poco calcáreas forman delgadas divisiones entre las limolitas calcáreas (1-10 cm) y también contienen ostras e improntas de amonites.

La facies 3 caracteriza la base de las secciones Los Catutos y Arroyo Covunco (Zona de *Virgatospinctes mendozanus*) donde forma un paquete de 4 m de espesor.

Interpretación

La naturaleza clástica de los depósitos de la facies 3, así como la alta fragmentación y la disposición caótica de los bioclastos sugiere un ambiente de energía moderada a alta. Las ostras fragmentadas indican que las mismas estuvieron sometidas a flujos oscilatorios, de manera que el golpeteo entre ellas promoviera su fragmentación. Sin embargo, la intercalación de pelitas y margas poco calcáreas indica que por momentos el ambiente presentaba condiciones de baja energía, donde la sedimentación ocurría por decantación.

Se interpreta que la facies 3 se depositó por encima del nivel de olas de tormenta, probablemente en la zona de transición al *shoreface* inferior.

Facies 4 (rampa externa)

Descripción

La facies 4 está constituida por la intercalación de margas (Mrh) con *packstones* peloidales masivos (P_pm). Subordinadamente aparecen facies de *rudstones* bioclásticos gradados (R_g) y *bindstones* microbianos laminados (B_ml) (Figura 5).

Las margas (Mrh) son laminadas de color negro a gris oscuro, con espesores de 15 a 40 cm, y se alternan en bancos con diferente contenido de carbonato de calcio y con las facies carbonáticas.

Los *packstones* peloidales masivos (P_pm) son tabulares, de color gris oscuro a negro y espesores de 15 a 30 cm. Los límites son netos y planos, la bioturbación está generalmente ausente. Contienen partículas esqueléticas dispersas incluyendo amonites, ápticos y bivalvos. La disposición de los bioclastos es concordante con la laminación. Los bivalvos aparecen articulados o desarticulados, y bien preservados.

En lámina delgada se distinguen dos microfacies: *packstones/wackestones* radiolaríticos y *packstones* peloidales (Figura 5). Los primeros consisten en acumulaciones de radiolarios inmersos en una matriz micrítica laminada con abundante contenido de materia orgánica, escamas de peces y escasos fragmentos de bivalvos.

Los *packstones* peloidales contienen peloides tamaño arena media (microcoprolitos de crustáceos), radiolarios, foraminíferos bentónicos (*Epistomina*, *Lenticulina* y miliólidos), espículas de esponjas monoaxonas y algas dasycladáceas transportadas.

Los *rudstones* bioclásticos (R_g) se presentan en capas tabulares de 5 a 15 cm de espesor, con un

límite basal neto y erosivo. Consisten en concentraciones bioclásticas de empaquetamiento denso y se intercalan con los *packstones* peloidales. Los bioclastos están conformados principalmente por ostreidos, aunque en menor medida aparecen trigonias, otros bivalvos recristalizados y amonites. Los bancos son masivos o con gradación inversa. Las valvas aparecen desarticuladas y fragmentadas. La matriz es peloidal y contienen además foraminíferos bentónicos y escasos terrígenos.

Los *bindstones* microbianos laminados (Bml) son tabulares, con una fina laminación de aspecto irregular que consiste en la alternancia de láminas micríticas y láminas de calcita granular. Las láminas micríticas contienen radiolarios, foraminíferos y calciesferas. La morfología de crecimiento es laminar. En planta se observan acumulaciones de intraclastos de las mismas láminas microbianas.

La facies 4 forma parte del Miembro Los Catutos y aparece en las secciones Los Catutos, Arroyo Covunco, y Mallín de los Caballos en la zona de *Aulacosphinctes proximus*, mientras que en las secciones Mallín Quemado Sur y Mallín Quemado se encuentra en la parte inferior de la Zona de *Windhausenicerias internispinosum*.

En las secciones Los Catutos y Mallín de los Caballos la facies 4 presenta desarrollo de cicatrices de deslizamientos de 10 a 15 m de ancho, así como deslizamientos sinsedimentarios con vergencia hacia el noroeste, lo que se encuentra rellenos por la misma facies 4.

Interpretación

La facies 4 está compuesta por litofacies que involucran una mezcla de procesos generados durante los períodos de buen tiempo y de tormenta. La abundancia de radiolarios, la buena laminación, la presencia de escamas de peces y el alto contenido de materia orgánica indican que los *packstones/wackestones* radiolaríticos se acumularon por decantación en un ambiente de baja energía, marino abierto y en condiciones deficientes en oxígeno. Sin embargo la presencia de fragmentos de bivalvos sugiere que parte de las partículas fueron transportadas durante las tormentas.

Los *packstones* peloidales contienen componentes que sugieren la proveniencia de aguas someras, como los foraminíferos miliólidos y algas dasycladáceas. La presencia de radiolarios y espículas de esponjas monoaxonas sugiere a su vez aguas tranquilas y marino normales.

La base erosiva, el aspecto masivo y/o la gradación inversa en los *rudstones* bioclásticos permite interpretarlos como tempestitas distales.

Los *bindstones* microbianos se relacionan con la proliferación de matas microbianas que prosperaron en un ambiente de baja energía y baja tasa de sedimentación, probablemente en condiciones transgresivas. La acumulación de fragmentos de matas microbianas puede interpretarse como removilización de las láminas microbianas a partir de corrientes de fondo relacionadas con eventos de tormentas.

Se interpreta que la facies SVM-4 se depositó en sectores de rampa externa donde los

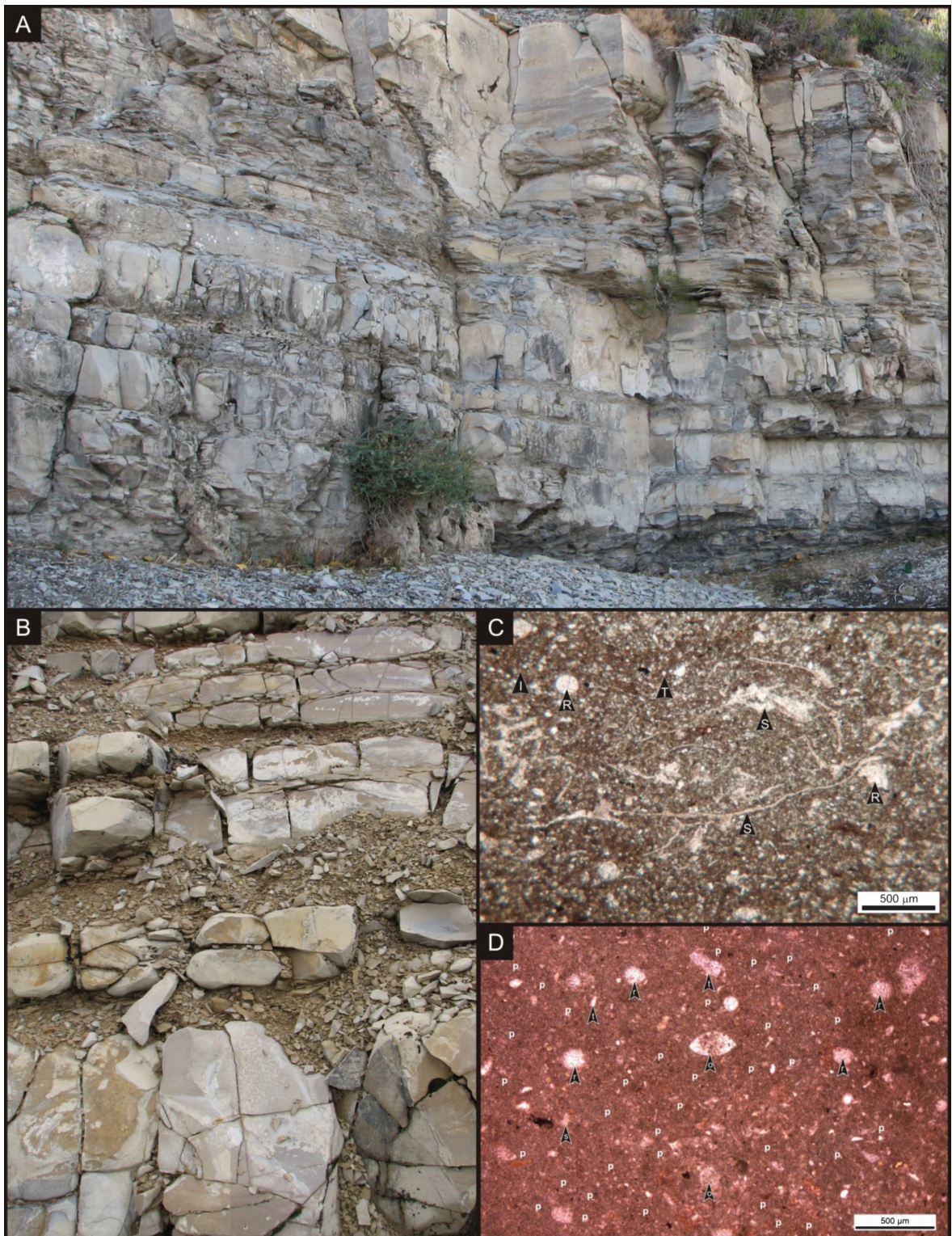


Figura 5. A-B) Aspecto general de la facies 4 (rampa externa) en la sección Mallín de los Caballos (A) y Arroyo Covunco (B) mostrando una alternancia de margas (Mrh) con *packstones* peloidales masivos (Ppm). C) *Packstone/wackestone* radiolarítico, con abundantes radiolarios (R), terrígenos (R) y microcrinoideos saccocómidos (S). D) *Packstone* peloidal formado por abundantes peloides tamaño arena media (P), radiolarios (R), ostrácodos (O) y microcrinoideos saccocómidos (S).

wackestones/packstones radiolaríticos representan las facies más distales y los *packstones* peloidales las facies más proximales, aunque no se descarta que estas facies puedan haber sido depositadas por encima del nivel normal de olas de tormenta (ver Kietzmann y Palma 2011). Se interpreta que la facies 4 se depositó en sectores de rampa externa.

Facies 5 (rampa interna)

Descripción

La facies 5 está constituida por la intercalación *packstones/grainstones* peloidales masivos o con estratificación entrecruzada (PG_pm, PG_pp), *packstones/grainstones* peloidales con laminación heterolítica de corriente y oleaje (PG_pr) y margas calcáreas (Mrh) (Figura 6). Subordinadamente aparecen *grainstones* oolíticos (G_op) y areniscas gruesas con estratificación entrecruzada (Sp).

Los *packstones/grainstones* peloidales masivos (PG_pm) son las facies más abundantes. Macroscópicamente presentan aspecto masivo, aunque presentan límites ondulados y eventualmente se preserva estratificación entrecruzada (PG_pp). Los bancos son tabulares a lentiformes, de color gris oscuro a negro, y presentan espesores de 20 a 40 cm. Los límites son netos y la bioturbación está representada por trazas irregulares posiblemente asignables a bivalvos. Contienen *pellets* tamaño arena media, radiolarios, foraminíferos bentónicos (*Epistomina* y miliólidos), algas dasycladáceas, microcrinoideos saccocómidos, abundantes terrígenos tamaño limo y cristales de dolomita.

Los *packstones/grainstones* peloidales con laminación heterolítica aparecen como depósitos finamente laminados formando paquetes de 2 a 10 m de espesor (Figura 6). Consisten en una alternancia de láminas limosas/peloidales con laminación ondulítica de oleaje y de corriente, y láminas fango-sostenidas con radiolarios, espículas de esponjas, miliólidos, ostrácodos y placas de microcrinoideos saccocómidos. La laminación ondulítica es de bajo ángulo y se asocia a canalizaciones de 5 a 10 mm de espesor y 5 a 15 cm de ancho (Figura 6).

Los *grainstones* oolíticos con estratificación entrecruzada (G_op) son tabulares y presentan espesores de 20 a 30 cm. Contienen oolitas simples y compuestas tamaño arena media a gruesa. Las oolitas contienen láminas con textura tangencial y los núcleos incluyen fragmentos de bivalvos, equinodermos, terrígenos y líticos volcánicos (Figura 6). Presentan dos fases de cementación: la primera consiste en calcita en diente de perro, mientras que la segunda consiste en calcita granular y en mosaico, que oblitera gran parte de los poros.

Las areniscas gruesas con estratificación entrecruzada (Sp) forman bancos lentiformes de 20 a 30 cm, con *sets* de 15 a 20 cm de espesor. Los límites son netos y la bioturbación está ausente. Las caras frontales son de tipo sigmoidal y poseen cortinas de fango. Consisten en arenitas feldespáticas gruesas compuestas por plagioclasas de origen volcánico, líticos volcánicos, cuarzo y micas.

Las margas (Mrh) son laminadas de color negro a gris oscuro, con espesores de 10 a 20 cm,

mucho más reducido respecto de las asociaciones de facies anteriores.

La facies 5 está presente en todas las secciones levantadas a lo largo de la Sierra de la Vaca Muerta y representa gran parte del Miembro Los Catutos. En las secciones Los Catutos, Arroyo Covunco y Mallín de los Caballos está presente en la Zona de *Aulacosphinctes proximus* y *Windhausenicerias internispinosum*, mientras que en las secciones de Mallín Quemado aparece sólo en la Zona de *Windhausenicerias internispinosum*. Las facies heterolíticas han sido reconocidas solamente en las secciones Los Catutos, Arroyo Covunco y Mallín de los Caballos.

Interpretación

La facies 5 se interpreta como depósitos de rampa interna. La geometría lentiforme, así como la abundancia de peloides y terrígenos en los *packstones/grainstones* peloidales, la presencia de estructuras entrecruzadas y la escasez de fango, sugieren un ambiente dominado por la acción de procesos tractivos.

La presencia de foraminíferos miliólidos, algas dasycladáceas y cristales romboédricos de dolomita sugieren un área de deposición somera.

Las facies oolíticas tangenciales sugieren aguas agitadas, asimismo el cemento de calcita en diente de perro sugiere un ambiente diagenético marino freático, mientras que la segunda fase de calcita granular una diagénesis freática de agua dulce.

Las areniscas con estratificación entrecruzada con cortinas de fango se interpretan como la migración de megaóndulas en canales de marea. Mientras que los *packstones* peloidales con laminación heterolítica sugieren un ambiente submareal somero a intermareal.

Asociaciones de facies

En el tramo comprendido entre los Miembros Inferior y Los Catutos en el área de la Sierra de la Vaca Muerta se reconocieron dos asociaciones de facies:

Asociación de facies 1 (plataforma silicoclástica): La asociación de facies 1 coincide con el miembro inferior de la Formación Vaca Muerta e incluye las facies 1 (cuenca), 2 (zona de transición) y 3 (zona de transición a *shoreface* inferior).

Se interpreta como un ambiente de plataforma silicoclástica con influencias de oleaje de tormenta con características transgresivas. Las facies más someras se desarrollan en la sección Los Catutos como facies de zona de transición a *shoreface* inferior, mientras que las más profundas se encuentran hacia el norte en la sección Mallín Quemado como facies de cuenca.

El arreglo vertical de estas facies muestra un tren de facies transgresivo que se correlacionan lateralmente a lo largo de las secciones estudiadas. Se inicia con una brusca inundación en la sección inferior, en la cual se ponen en contacto depósitos fluviales de la Formación Tordillo con depósitos marinos de características restringidas.

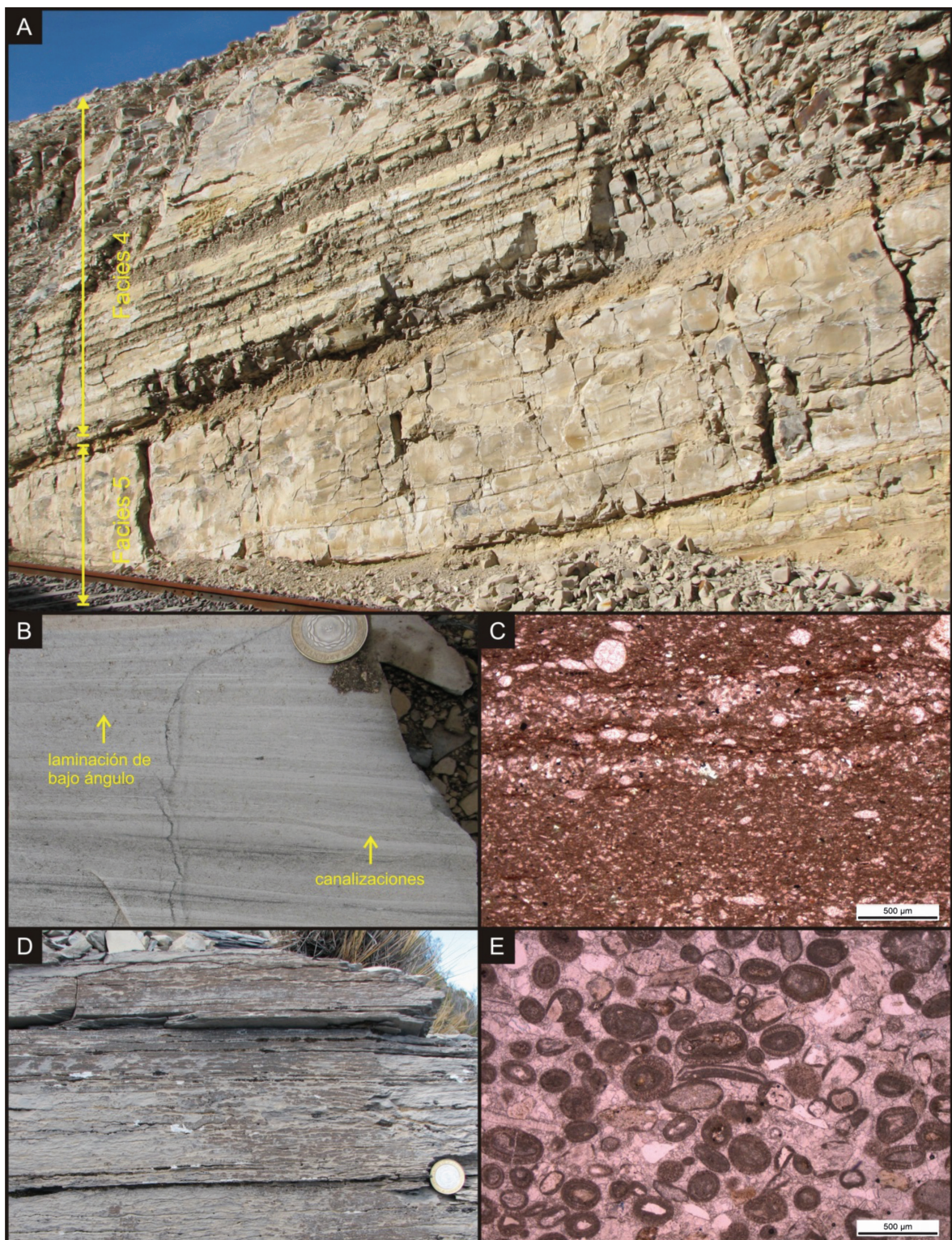


Figura 6. A) Aspecto general de la facies 5 (rampa interna) en la sección Los Catutos. Notar las superficies onduladas que cambian de espesor lateralmente. B-D) *Packstones/grainstones* peloidales con laminación heterolítica ($PG_p r$), donde se observa una característica laminación ondulítica de bajo ángulo y canalizaciones de pequeña escala. E) Facies de *grainstones* oolíticos que aparecen de manera subordinada en la facies 5.

Asociación de facies 2 (rampa carbonática): La asociación de facies 2 corresponde al Miembro Los Catutos de la Formación Vaca Muerta e incluye las facies 1 (cuenca), 4 (rampa externa a media) y 5 (rampa interna).

La rampa de Los Catutos era un sistema depositacional de baja energía con influencia episódica de oleaje de tormentas. Las áreas someras estaban representadas por sectores protegidos de muy baja energía que se desarrollaban entre barras peloidales y planicies de marea. Hacia los sectores más externos de la rampa interna las barras eran oolíticas y se intercalaban con canales de mareas que conectaban el área protegida con el área netamente marina de rampa externa a media. La asociación de facies 2 caracteriza el Tithoniano medio alto y superior bajo (Zonas de *Aulacosphinctes proximus* y *Windhausenicerias internispinosum*). Las facies más someras y más espesas se encuentran en la secciones de la parte sur de la Sierra de la Vaca Muerta, mientras que hacia el norte, las facies se profundizan y adelgazan progresivamente hasta finalmente desaparecer al norte de la sección Mallín Quemado. El límite superior de esta asociación de facies coincide con una superficie de inundación regional de extensión regional en toda la cuenca.

La presencia de cicatrices de arrastre y deslizamientos sinsedimentarios se desarrollan en niveles temporalmente equivalentes, en facies de rampa externa de la sección Mallín de los Caballos y de rampa interna en Los Catutos, sugiriendo inestabilidad en la rampa carbonática probablemente relacionada con actividad en la dorsal de Huinul.

ASOCIACIÓN DE MINERALES EN MARGAS Y PELITAS

Las muestras analizadas muestran una asociación mineralógica dominada por cuarzo (39 a 47%, media ~40%), al sigue en abundancia la plagioclasa (20 a 42%, media ~23%). No se han encontrado indicios de otros feldespatos. La calcita presenta un comportamiento variable. En casi todas las muestras su contenido es inverso al de cuarzo. En la parte inferior del Miembro Inferior está completamente ausente, en tanto que los niveles superiores del Miembro Inferior alcanzan entre 7 y 10%. Por el contrario, en el miembro Los Catutos los valores alcanzan el 72%. No se han identificado otros carbonatos en estas muestras.

El contenido de arcillas varía entre 16 y el 31%, para el Miembro Inferior, y tanto sólo alcanza el 6% en el Miembro Los Catutos. La composición está dominada por illita, illita/esmectita y clorita.

La composición de la fracción menor de 2 µm es monótona, y está dominada por illita e illita/esmectita. La clorita aparece con niveles altos en la base de la unidad y luego aparece prácticamente constante aunque en proporciones variables. Luego de los primeros metros la sucesión se enriquece rápidamente en illita e illita/esmectita.

ESTRATIGRAFÍA SECUENCIAL

En el sector de la Sierra de la Vaca Muerta se analizó en detalle las variaciones laterales del primer ciclo transgresivo-regresivo de escala regional (CS-1 en Kietzmann *et al.* 2014 y Kietzmann *et al.* en este congreso), así como las tres secuencias depositacionales de alta frecuencia que contiene (Figura 7).

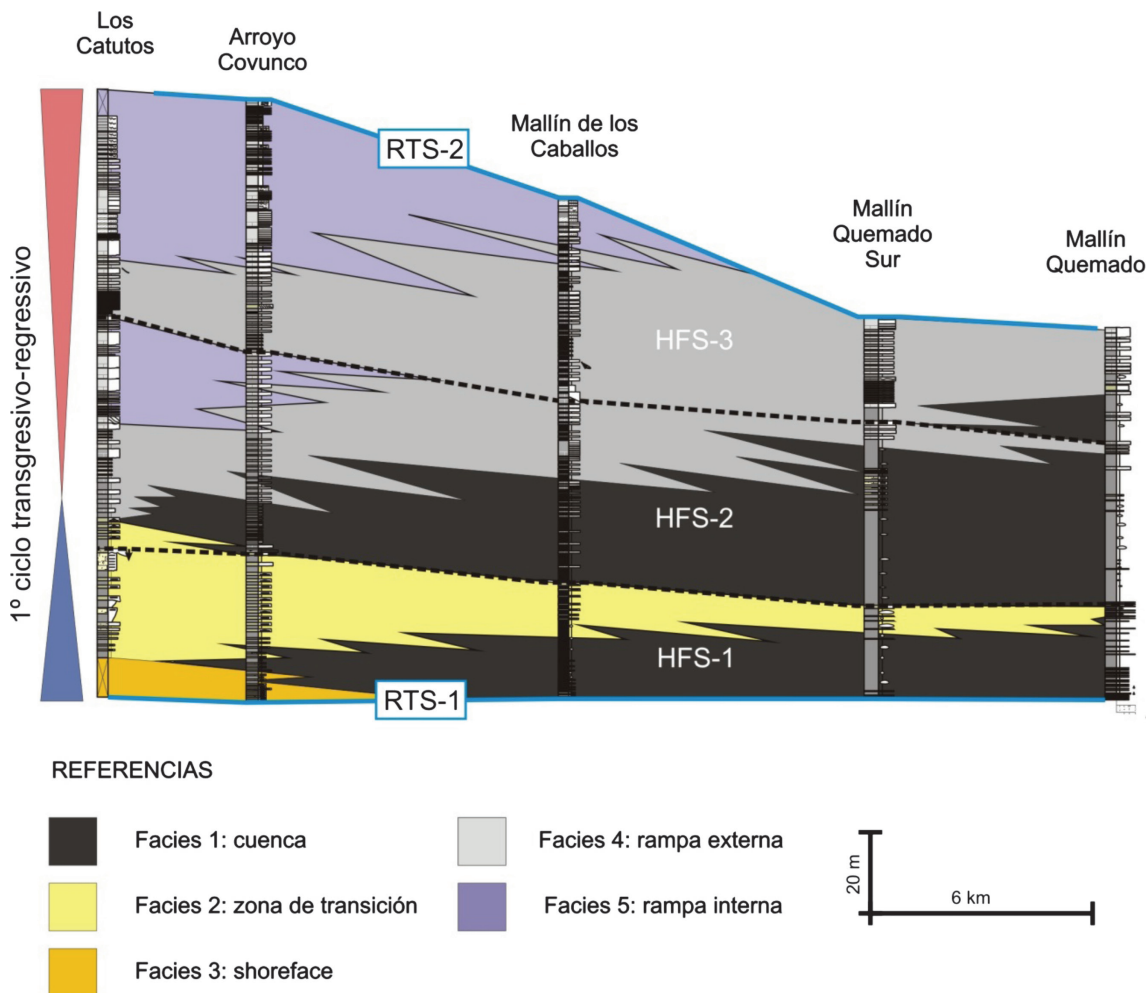


Figura 7. Correlación de facies y secuencias depositacionales para las secciones estratigráficas analizadas en el sector de la Sierra de la Vaca Muerta. Referencias: (HFS) secuencia depositacional de alta frecuencia, (RTS) superficie transgresiva regional.

El primer ciclo transgresivo-regresivo se inicia con la superficie de inundación regional que caracteriza la base de la Formación Vaca Muerta (RTS-1) y se extiende desde la Zona de *Virgatophinctes mendozanus* (Tithoniano inferior alto) en la base de la unidad, hasta la base de la Zona de *Windhausenicerias internispinosum* (Tithoniano superior bajo) donde se encuentra la segunda super-

ficie de inundación regional (RTS-2). Contiene tres secuencias depositacionales de alta frecuencia (HFS 1, 2 y 3).

La primer secuencia depositacional (HFS-1) corresponde a un sistema esencialmente clástico representado por la asociación de facies 1 (plataforma silicoclástica). En las secciones Los Catutos y Arroyo Covunco esta secuencia culmina con una superficie de exposición subaérea, reflejada en Los Catutos por una superficie erosiva y depósitos de areniscas gruesas masivas o con estratificación entrecruzada. En la secciones del Arroyo Covunco y Mallín de los Caballos este límite está representado por la progradación de las facies 3.

Las secuencias HFS-2 y HFS-3 están representadas por progradaciones del sistema de rampa carbonática de la asociación de facies 2. Las facies más someras se restringen a las secciones Los Catutos y Arroyo Covunco, haciéndose más distales hacia el norte.

Las variaciones en el contenido de cuarzo, calcita y minerales de arcilla muestran una excelente correlación con los cortejos sedimentarios reconocidos en el análisis estratigráfico secuencial. En líneas generales se observa que el cortejo transgresivo de la primera secuencia compuesta (CS-1) está enriquecido en cuarzo y minerales de arcilla, mientras que el cortejo de mar alto en calcita. Este comportamiento se repite en las secuencias depositacionales de alta frecuencia (HFS-1 a 3).

CONCLUSIONES

Las secuencias basales de la Formación Vaca Muerta en el área de la Sierra de la Vaca Muerta se inician con un sistema depositacional de plataforma silicoclástica (asociación de facies 1), incluyendo facies de cuenca (Facies 1), zona de transición (facies 2) y *shoreface* inferior (facies 3), y continúan con un sistema de rampa carbonática (asociación de facies 2) conformado por facies de cuenca (facies 1), rampa externa (facies 4) y rampa interna (facies 5).

El ciclo transgresivo-regresivo comprendido entre la Zona de *Virgatosphinctes mendozanus* (Tithoniano inferior alto) a la base de la Zona de *Windhausenicerias internispinosum* (Tithoniano superior bajo) o secuencia compuesta CS-1, contiene tres secuencias depositacionales de alta frecuencia, que podrían ser correlacionadas con las primeras tres secuencias de Mitchum y Uliana (1985) y muestra variaciones de facies relativamente rápidas en pocos kilómetros.

Una de las características que presenta el sistema depositacional de la Formación Vaca Muerta en el área estudiada es el pasaje transicional entre facies, que solo puede ser analizado mediante la observación conjunta de diferentes escalas (Macro-, meso y microscópica). Particularmente los estudios petrográficos han resultado extremadamente útiles para reconocer procesos depositacionales que quedan enmascarados macroscópicamente. Sin embargo, las variaciones laterales de facies también son significativas, pasando de 90 m de carbonatos del Miembro Los Catutos en la localidad de Los Catutos, hasta no más de 15 m en la localidad de Mallín Quemado, 20 km al norte.

Si bien los depósitos de la Formación Vaca Muerta han sido considerados tradicionalmente como profundos, los perfiles estudiados muestran numerosas evidencias de un ambiente más somero, lo cual es consistente con la terminación de los primeros tres quiebres de secuencia de Mitchum y Uliana (1985) y con las pendientes extremadamente bajas que se deducen de esas secciones sísmicas (0,1 a 0,2 grados).

Por último, la presencia de cicatrices de desmoronamientos y deslizamientos sinsedimentarios en la sección Mallín de los Caballos y Los Catutos en la base de la tercer secuencia depositacional de alta frecuencia (HFS-3) podría sugerir la presencia de un talud en las facies más distales asociado al cortejo transgresivo de una rampa distalmente profundizada, aunque dada su característica regional (15 km) podría ser la respuesta a la inestabilización en la rampa producto de la actividad episódica de la dorsal de Huincul.

Las variaciones en el contenido de cuarzo, calcita y minerales de arcilla muestran una excelente correlación con los cortejos sedimentarios de las secuencias compuestas y las secuencias de alta frecuencia.

AGRADECIMIENTOS

Se desea agradecer a Shell Exploration and Production Company por permitir la publicación de los resultados presentados en este trabajo. Esta es la contribución C-80 del Instituto de Estudios Andinos “Don Pablo Groeber”.

REFERENCIAS CITADAS

- Carozzi, A.V., Orchuela, I.A. y Rodríguez Schelotto, M.L. 1993. Depositional models of the Lower Cretaceous Quintuco-Loma Montosa Formation, Neuquén Basin, Argentina. *Journal of Petroleum Geology* 16: 421-450.
- Gulisano, C., Gutiérrez Pleimling, R. y Digregorio, R.E. 1984. Análisis estratigráfico del intervalo Tithoniano-Valanginiano (Formaciones Vaca Muerta, Quintuco y Mulichinco) en el suroeste de la provincia del Neuquén. 9º Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 221-235, Bariloche.
- Kietzmann, D.A. y Palma, R.M. 2011. Las tempestitas peloidales de la Formación Vaca Muerta (Tithoniano-Valanginiano) en el sector surmendocino de la Cuenca Neuquina, Argentina. *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis* 18(2): 121-149.
- Kietzmann, D.A., Palma, R.M., Riccardi, A.C., Martín-Chivelet, J. y López-Gómez, J. 2014. 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: 64-86.
- Kietzmann, D.A., Ambrosio, A.L., Suriano, J., Alonso, M.S., Vennari, V.V., Aguirre-Urreta, M.B., Depine, G., Repol, D. 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, Mendoza.
- Leanza, H.A. 1972. *Acantholissonia*, nuevo género de ammonites del Valanginiano de Neuquén, Argentina, y su posición estratigráfica. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 17: 63-70.
- Leanza, H.A. 1973. Estudio sobre los cambios faciales de los estratos limítrofes Jurásico-Cretácicos entre Loncopué y Picún Leufú, Provincia del Neuquén, República Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 28: 97-132.
- Leanza, H. y Zeiss, A. 1990. Upper Jurassic Lithographic Limestones from Argentina (Neuquén Basin): Stratigraphy and Fossils. *Facies* 22:169-186.
- Leanza, H. y Zeiss, A. 1992. On the ammonite fauna of the Lithographic Limestones from the Zapala region (Neuquén province, Argentina), with the description of a new genus. *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie, Teil 1, H.6*: 1841-1850.
- Leanza, H.A. y Zeiss, A. 1994. The Lithographic Limestones of Zapala (Central Argentina) and their ammonite fauna. *Geobios* 16: 245-250.
- Leanza, H.A., Marchese, H.G y Riggi, J.C. 1977. Estratigrafía del Grupo Mendoza con especial referencia a la Formación Vaca Muerta entre los Paralelos 35° y 40° l.s. Cuenca Neuquina-Mendocina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 32 (1978): 190-208.
- Legarreta, L. y Gulisano, C.A. 1989. Análisis estratigráfico de la Cuenca Neuquina (Triásico Superior-Terciario Inferior). En: Chebli, G.A. y Spalletti, L.A. (eds.), *Cuencas Sedimentarias Argentinas*. Simposio Cuencas Sedimentarias Argentinas, Serie Correlación Geológica 6: 221-243, Tucumán.
- Legarreta, L. y Uliana, M.A. 1991. Jurassic-Cretaceous Marine Oscillations and Geometry of Back Arc Basin, Central Argentina Andes. En McDonald, D.I.M. (ed.), *Sea level changes at active plate margins: Process and product*. IAS Special Publication 12, p. 429-450, Oxford.
- Legarreta, L. y Uliana, M.A. 1996. The Jurassic succession in west central Argentina: stratal patterns, sequences, and paleogeographic evolution. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 120: 303-330.
- Mitchum, R.M. y Uliana, M. 1985. Seismic stratigraphy of carbonate depositional sequences, Upper Jurassic-Lower Cretaceous, Neuquén Basin, Argentina. En: Berg, B.R. y Woolverton, D.G. (eds.) *Seismic Stratigraphy 2. An integrated approach to hydrocarbon analysis*. American Association of Petroleum Geologists, Memoir 39: 255-83, Tulsa.
- Scasso, R.A., Alonso, S. M., Lanés, S., Villar, H.J. y Lippai, H. 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: 143-159.
- Scasso, R.A., Alonso, S.M., Lanés, S., Villar, H.J. y Lippai, H. 2005. Geochemistry and petrology of a Middle Tithonian limestone-marl rhythmite in the Neuquén Basin, Argentina: depositional and burial history. En Veiga, G.D., Spalletti, L.A., Howell, J.A. y Schwarz, E. (eds.), *The Neuquén Basin, Argentina: A Case Study in Sequence Stratigraphy and Basin Dynamics*. The Geological Society, Special Publications 252: 207-229, London.
- Weaver, C. 1931. Paleontology of the Jurassic and Cretaceous of West Central Argentina. *Memoir University of Washington* 1, 469 p., Seattle.