

ANÁLISIS SEDIMENTOLÓGICO Y ESTRATIGRÁFICO SECUENCIAL DE LAS FORMACIONES VACA MUERTA Y QUINTUCO EN EL ÁREA DE CHOS MALAL, 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, rampa mixta, Formación Vaca Muerta

ABSTRACT

Sedimentologic and sequence stratigraphic analysis of the Vaca Muerta and Quintuco Formations in Chos Malal area, 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 three sections in Chos Malal area, northern Neuquén province. Detailed facies analysis allows to differentiate six facies associations, representing basinal to middle ramp facies of a homoclinal carbonate ramp system (Vaca Muerta Formation), and basinal to shoreface facies of a mixed carbonate/siliciclastic shelf system (Quintuco Formation), prograding westward from the eastern margin of the basin. Two sequence hierarchies are recognized, including five composite depositional sequences and thirteen high-frequency sequences. These results are useful as analogs in nearby areas, since the shelf breaks mapped by Mitchum and Uliana ends perpendicular to the area of study.

INTRODUCCIÓN

En este trabajo se analizan las facies sedimentarias y la arquitectura de las secuencias sedimentarias a lo largo de una transecta E-O, formada por tres secciones estratigráficas aflorantes en el área de Chos Malal, norte de Neuquén (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).

En concordancia con Cangini (1968) y Marchese (1971), Leanza (1972) enmendó la definición original de la Formación Vaca Muerta incluyendo en ella a la Formación Quintuco de Weaver (1931). En los trabajos de Mitchum y Uliana (1985) y Carozzi *et al.* (1993) el término de Formación Quintuco es utilizado para incluir un conjunto de calizas bioclásticas y oolíticas, calcarenitas y dolomías de plataforma, concepción que perduró esencialmente en la industria.

Por último, Leanza *et al.* (2001) introdujeron el Miembro Huncal de la Formación Vaca Muerta en el norte de Neuquén, para un conjunto de areniscas con deformación sinsedimentaria (*slumps*) con vergencia hacia el este, que fue asignado por Leanza *et al.* (2003) al Berriasiano inferior. En el cerro Domuyo el Miembro Huncal contiene amonites de la Zona de *Substeueroceras koeneni* (Tithoniano tardío - Berriasiano temprano) (Kietzmann y Vennari 2013).

En el área de estudio existen escasos trabajos publicados referentes a la sedimentología y a las secuenciales depositacionales. Entre ellos, el monumental trabajo publicado por Mitchum y Uliana (1985), dio a conocer la arquitectura de este intervalo con impresionante precisión, luego aplicada por Legarreta y Gulisano (1989) y Legarreta y Uliana (1991, 1996), entre otros.

Las primeras descripciones sedimentológicas basadas en el análisis de facies fueron realizadas por Spalletti *et al.* (1999) en el área de la Yesera del Tromen. Posteriormente, Leanza *et al.* (2003), Spalletti *et al.* (2008) y Kietzmann y Vennari (2013) describieron con detalle el Miembro Huncal en diferentes localidades.

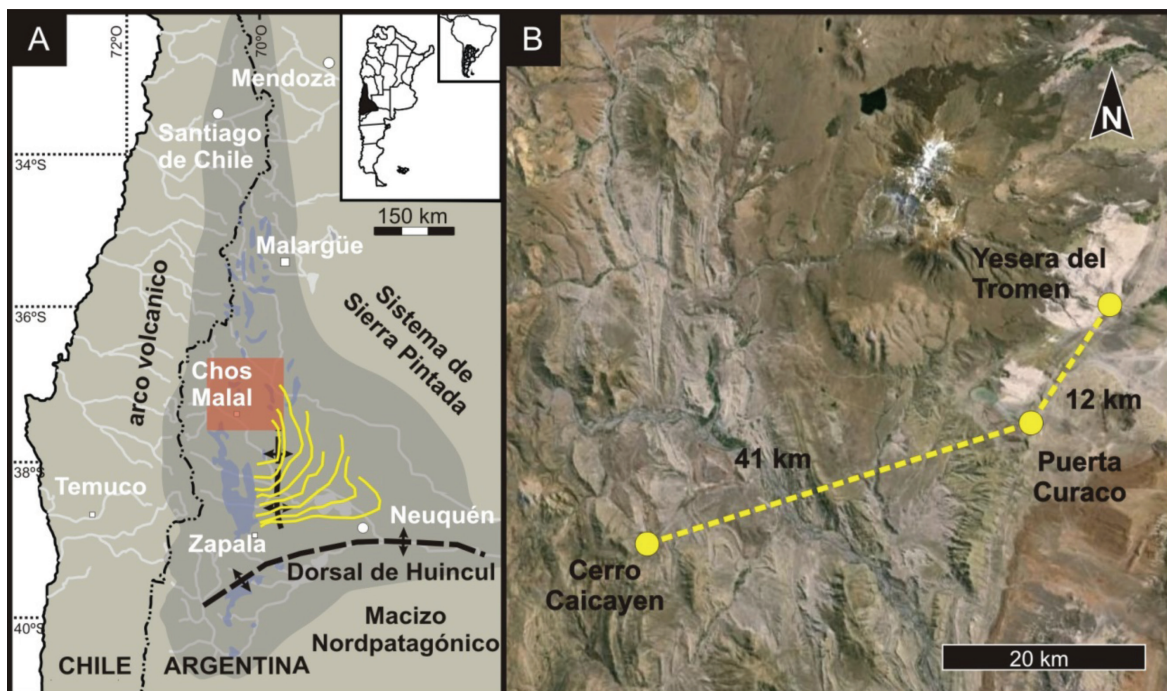


Figura 1. A) Ubicación del área de estudio. En azul se muestran los afloramientos del Grupo Mendoza (tomado de Leanza *et al.* 1977), y en amarillo los quiebres de plataforma de Mitchum y Uliana (1985). B) Ubicación de las secciones estratigráficas levantadas en detalle.

El objetivo principal de este trabajo es contribuir a la comprensión de la dinámica depositacional, así como a las variaciones verticales y laterales de facies en el 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 últimas secuencias depositacionales mapeadas por Mitchum y Uliana (1985) terminan perpendicularmente al área de estudio, por lo que estos resultados sirven como análogos en áreas cercanas.

ÁREA DE ESTUDIO

En el área norte de la provincia de Neuquén se levantaron tres perfiles sedimentarios correspondientes a las localidades de Yesera del Tromen, Puerta Curaco y Cerro Caicayén. Datos adicionales fueron tomados en secciones Barranca de los Loros, Mina La Carrascosa y Chachay Melehue (Figura 1).

Las secciones Puerta Curaco y Yesera del Tromen afloran en el área denominada Pampa de Tril, en las cercanías de la localidad de Chos Malal. La distancia entre ambas secciones es de alrededor de 10 km. La sección Puerta Curaco aflora sobre la ruta provincial 7, en las cercanías de la laguna Auquingo, 30 km al este de Chos Malal, mientras que la sección Yesera del Tromen aflora sobre la ruta nacional 40 y se encuentra a unos 35 km de la ciudad de Chos Malal.

En estas localidades la Formación Vaca Muerta tiene una edad tithoniana temprana - berriasiana tardía (Zonas de amonites de *Virgatospinctes mendozanus* a *Spiticerias damesi*), mientras que la Formación Quintuco tiene una edad valanginiana temprana (Zonas de amonites de *Neocomites wichmanni* y *Lissonia riveroi*) (Leanza et al. 1977, Mitchum y Uliana 1985).

El contacto basal de la Formación Vaca Muerta, que se inicia con un nivel microbiano muy característico, es concordante y neto con facies lacustres del Miembro Superior de la Formación Tordillo. El contacto superior consiste en un pasaje transicional a la Formación Quintuco y se reconoce como un incremento de bancos limo-arenosos con abundante fauna de ambientes someros. El contacto entre las Formaciones Quintuco y Mulichinco está dado por una dislocación

Edad	Ciclos/ Secuencias			Litoestratigrafía	Ambiente sedimentario
Barremiano	Ándico (parcial) Mesosecuencia Mendoza	Superior	Grupo Mendoza	Fm. Agrio	rampa mixta
Hauteriviano				Fm. Mulichinco	shoreface
Valanginiano				Fm. Quintuco	offshore/trans.
Berriasiano		Inferior	Grupo Mendoza	Fm. Vaca Muerta	rampa media a cuenca
Tithoniano					

Figura 2. Cuadro estratigráfico de la Mesosecuencia Mendoza en el área de Chos Malal.

de facies que corresponde a la conformidad correlativa de la discordancia intravalanginiana.

En la sección del cerro Caicayén, que se ubica a unos 20 km al sudoeste de la ciudad de Chos Malal en las cercanías de la localidad de Tres Chorros, el contacto basal de la Formación Vaca Muerta ocurre concordantemente con facies fluviales del Miembro Inferior de la Formación Tordillo, mientras que el contacto superior consiste en un pasaje transicional a la Formación Mulichinco.

METODOLOGÍA

Para el estudio descriptivo de la Formación Vaca Muerta en las secciones Yesera del Tromen, Puerta Curaco y Cerro Caicayén se levantaron perfiles sedimentológicos y 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. En el caso de las calizas las descripciones fueron reforzadas mediante el estudio de microfacies, utilizando la clasificación textural de Dunham (1962) modificada por Embry y Klovan (1971). 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 *italica*), el segundo a los componentes principales (como subíndice), y el tercero hace referencia a las estructuras sedimentarias (Figura 3).

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 Chos Malal se reconocieron 18 litofacies que fueron agrupadas en 6 facies y 2 asociaciones de facies. Un resumen de su distribución se muestra en el Cuadro 1.

Facies 1 (rampa externa restringida a cuenca)

Descripción

La facies 1 consiste en una alternancia de margas (M_{rh}) y margas bioclásticas ($M_{b,h}$) entre las que se intercalan de manera subordinada *packstones* laminados (P_lh), *bindstones* microbianos ($B_{m,l}$) y tobas (T_m/g). La relación margas/carbonatos (M/C) es de ~9:1 (Figura 3). Esta facies está presente en las tres secciones analizadas.

Las margas (Mr_h , $Mr_{b,h}$) son laminadas de color negro a gris oscuro, con espesores de 5 a 40 cm, y se alternan bancos con diferente contenido de carbonato de calcio. La laminación es grotesca. Contienen abundantes escamas de peces y fragmentos óseos. Pueden estar bioturbadas por *Chondrites*. Subordinadamente aparecen amonites, bivalvos articulados y desarticulados (en ocasiones fragmentados), y foraminíferos epistominidos con orientación aleatoria. En esta facies las margas suelen contener concreciones subsféricas de entre 10 y 70 cm.

			FACIES					
			1: rampa externa restringida a cuenca	2: rampa externa	3: rampa media	4: Cuenca-talud	5: Cuenca-zona de transición	6: shoreface
FACIES	alta energía	Packstones laminados	P_h	R	MR	R		
		Grainstones laminados	G_h		S	R		
		Rudstones/grainstones bioclasticos	$RG_{b,m}$		S			
		Grainstones con laminación de bajo ángulo	G_l			MR		
		Grainstones con HCS	G_{hcs}			MR		
		Areniscas con laminación horizontal	Sh				S	MR
		Areniscas con laminación ondulítica de corriente	Sr				S	MR
		Areniscas con laminación ondulítica de oleaje	Sr_w					MR
		Areniscas con HCS	Sh_{cs}					MR
	baja energía	Bindstones microbianos	$B_{m,l}$	R		S		
		Wackestones laminados	$W_{l,h}/W_{e,h}$		R			
		Wackestones dolomitizados	W_d				S	
		Margas bioclasticas	$Mr_{b,h}$	MR	MR	MR		
		Margas laminadas	Mr_h	MR	MR	MR		
		Pelitas laminadas	Fl	MR			MR	MR
volcani-clásticas	Lapillitas		Lm/g			S		
	Tobas laminadas		Tm/g	S	R			
	Tobas con HCS		Th_{cs}			MR		

Figura 3. Facies y litofacies de las secciones analizadas en el área de Chos Malal. Referencias: (MR) facies más representativas, (R) facies representativas, (S) facies subordinadas.

Los *packstones* laminados (P_l) son de color gris oscuro a negro. La geometría es tabular, con espesores de 15 a 30 cm. Los límites son netos y planos y la bioturbación está generalmente ausente. Contienen partículas esqueléticas dispersas o como delgadas concentraciones bioclásticas.

Los bioclastos incluyen escamas y fragmentos óseos de peces, amonites y pequeños bivalvos. La disposición de los bioclastos es concordante con la laminación. Los bivalvos aparecen articulados o desarticulados, pero bien preservados. Son ricos en intraclastos micríticos y radiolarios. La naturaleza micrítica de las partículas dominantes lleva a la formación de pseudomatriz carbonática y macroscópicamente pueden confundirse con mudstones y *wackestones*.

Los *bindstones* microbianos (B_m) 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 y foraminíferos epistomínidos. La morfología de crecimiento es laminar. En planta se observan acumulaciones de intraclastos de las mismas láminas microbianas. Contiene amonites, fragmentos aislados de ostreidos, lucínidos y a veces fragmentos óseos.

Las tobas (T_m/g) están reemplazadas por carbonato de calcio mostrando un aspecto cristalino. Consisten en capas de carbonatos de color gris verdoso a gris parduzco. La geometría es tabular, con contactos netos y planos, presentando comúnmente estructuras de deformación por carga y estructuras tractivas. El espesor varía de 2 a 25 cm. Macroscópicamente no se observan partículas individuales, en cambio el reflejo de la luz permite identificar un mosaico de cristales de calcita poikilotópica que contienen trizas y/o fragmentos pumíceos (Figura 4).

Interpretación

Se interpreta que la facies 1 se depositó por debajo del nivel normal de olas de tormenta, en condiciones restringidas en oxigenación, en un ambiente de rampa externa restringida a cuenca. Está dominada por procesos de decantación a partir de suspensión de fango calcáreo y silico-clástico, partículas transportadas en suspensión durante eventos de tormenta y productividad de organismos planctónicos.

La laminación horizontal, así como el abundante contenido de escamas de peces permite inferir que la sedimentación ocurrió principalmente por decantación en condiciones de baja energía. El color negro y la ausencia de bioturbación sugieren condiciones deficientes en oxígeno. La presencia de bivalvos fragmentados, sugiere que una parte de los sedimentos tuvo que haber sido puesto en suspensión en condiciones de mayor energía, posiblemente en asociación con episodios de tormenta.

La intercalación episódica de las facies de tobas laminados y *packstones* laminados sugiere que el sector de depositación estaba influenciado ocasionalmente por depósitos de tormenta con características distales. La abundancia de intraclastos micríticos indica que la depositación ocurrió asociada a la instalación de una zona erosiva probablemente relacionada con la acción de tormentas en áreas más someras, que promovieron la exportación del material sedimentario como flujos “tipo turbidíticos” (tempestitas).

Los *bindstones* microbianos se relacionan con la proliferación de matas microbianas que prosperaron en un ambiente de baja energía y baja tasa de sedimentación. La presencia de radiolarios

y foraminíferos bentónicos (Epistomina) sugiere condiciones marinas abiertas y deficiencia en oxígeno. La acumulación de fragmentos de matas microbianas puede interpretarse como remobilización de las láminas microbianas a partir de corrientes de fondo relacionadas con eventos de tormentas.

Facies 2 (rampa externa)

Descripción

La facies 2 está constituida por la intercalación de margas (Mr_h , Mr_{bh}) con *packstones* y *grainstones* intraclásticos (P_ih , G_ih). Subordinadamente aparecen facies de *rudstones/grainstones* bioclásticos (R/G_{bm}), *wackestones* laminados (W_rh , W_eh) y tobas reemplazadas (Tm/g). La relación margas/carbonatos es ~3:1 (Figura 4). Esta facies está presente en las secciones Yesera del Tromen y Puerta Curaco.

Al igual que en la facies anterior, las margas (Mr_h , Mr_{bh}) son laminadas de color negro a gris oscuro, con espesores de 5 a 40 cm, y se alternan en bancos con diferente contenido de carbonato de calcio y con las facies carbonáticas. Contienen amonites, bivalvos articulados y desarticulados, en ocasiones fragmentados, y foraminíferos epistomínidos con orientación aleatoria.

Los *packstones/grainstones* intraclásticos (P_ih , G_ih) son similares a los de la facies anterior, pero aparecen en mayores proporciones y con espesores de 15 a 30 cm. Contienen partículas esqueletales dispersas incluyendo amonites y bivalvos. La disposición de los bivalvos es concordante con la laminación. Aparecen articulados o desarticulados. Algunos amonites (Aspidoceras) se disponen de manera vertical. Contienen en algunos casos concreciones retrabajadas, formadas durante la diagénesis temprana.

Los *rudstones/grainstones* bioclásticos (R/G_{bm}) se presentan en capas tabulares de 5 a 15 cm de espesor. El límite basal es neto, irregular y erosivo. Consisten en concentraciones bioclásticas de empaquetamiento denso. Los bioclastos están conformados principalmente por ostreidos, aunque en menor medida aparecen trigonias, otros bivalvos recristalizados, gastrópodos y amonites. Los bancos son masivos, aunque ocasionalmente presentan gradación inversa. Las valvas aparecen desarticuladas y fragmentadas. La matriz es peloidal y contienen además foraminíferos bentónicos y escasos terrígenos.

Los *wackestones* (W_rh , W_eh) son tabulares, con contactos netos y planos, tienen espesores de 15 a 35 cm. La bioturbación en general está ausente, pero ocasionalmente contiene Chondrites o trazas horizontales mal preservadas. Contiene bivalvos recristalizados, gastrópodos y amonites. Pueden ser radiolaríticos o estar dominados por foraminíferos epistomínidos.

Las tobas reemplazadas son similares a las de la facies 1, pero se presentan en bancos de mayor espesor.

Interpretación

La facies 2 se interpreta como un ambiente de la rampa externa. Está compuesta por facies que involucran una mezcla de procesos generados durante los períodos de buen tiempo y de tormenta. La presencia de bioclastos transportados en las margas y en los carbonatos sugiere que la sedimentación ocurrió por decantación de material transportado en suspensión y como flujos densos (tempestitas).

La presencia de *packstones* intraclásticos y peloidales indica erosión intermitente, probablemente asociada con procesos de tormentas, que ponían en suspensión las partículas y permitían su transporte hacia zonas más distales. La presencia de amonites dispuestos de manera vertical sugiere profundidades relativamente someras ya que los fragmoconos pudieron ser estables hidrostáticamente a profundidades cercanas a los ~ 50 m (e.g., Kietzmann y Palma, 2009).

Las concreciones retrabajadas sugieren que la formación de concreciones ocurrió en las etapas más tempranas de la diagénesis y evidencian procesos erosivos del sustrato previo a su litificación, probablemente relacionados con tormentas.

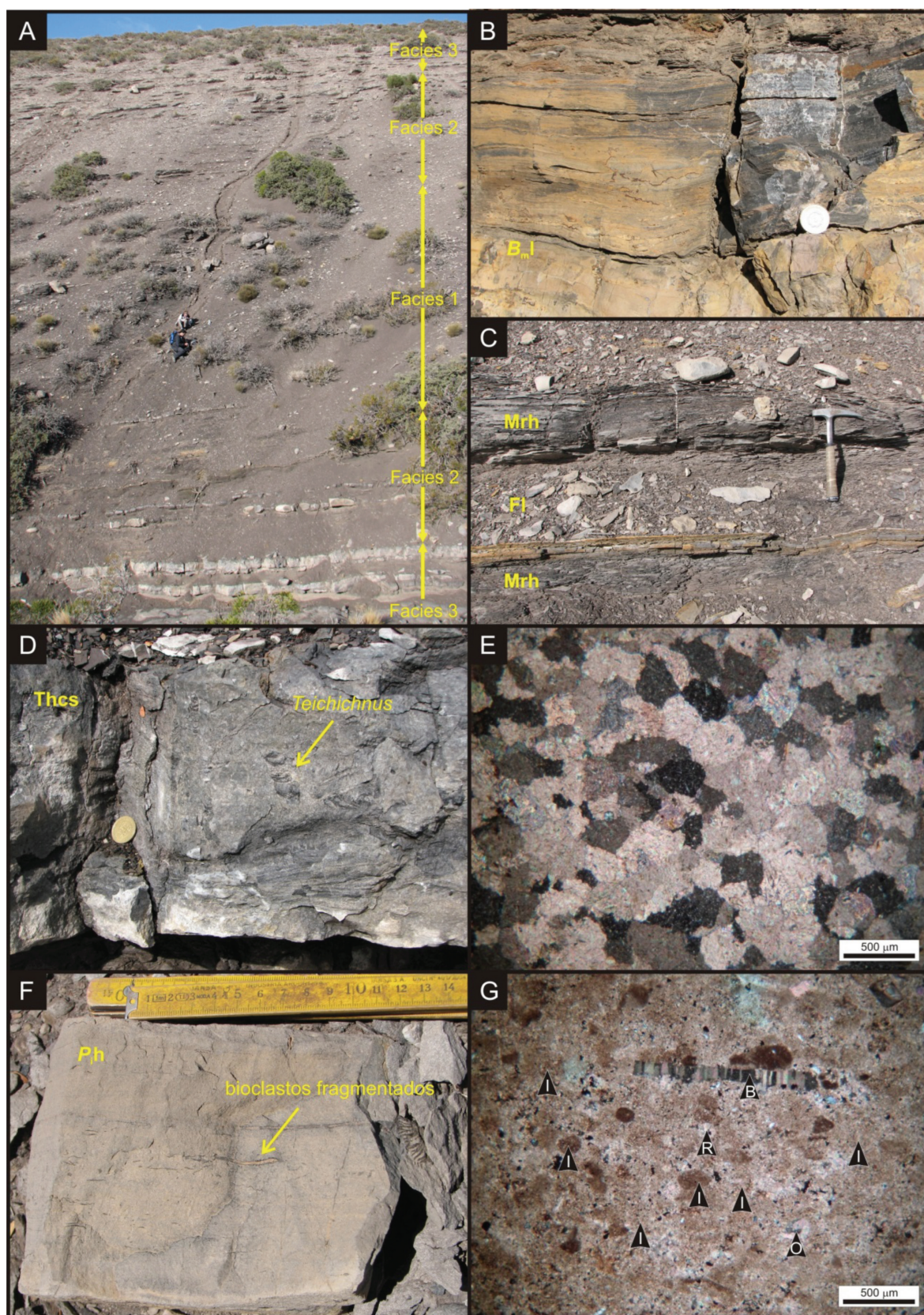
Inferencias similares pueden realizarse para las tobas reemplazadas y los *wackestones* con episominas, donde la gradación inversa y la disposición aleatoria de las partículas sugieren la deposición a partir de flujos densos y/o la acción de corrientes de fondo.

Facies 3 (rampa media distal)

Descripción

La facies 3 está representada por la alternancia de margas (Mr_h , Mr_{gh}), *packstones* intraclásticos laminados (P_lh), *packstones/grainstones* intraclásticos con estratificación entrecruzada de bajo ángulo (PG_l), *packstones/grainstones* intraclásticos con estratificación entrecruzada *hummocky* (PG_{lhc}) y tobas reemplazadas con estratificación entrecruzada *hummocky* ($Thcs$). Subordinadamente pueden aparecer facies de bindstones microbianos (B_{ml}) y lapillitas gradadas (Lm/g). La relación margas/carbonatos es ~3:1 (Figura 4). La facies 3 está presente en las secciones Yesera del Tromen y Puerta Curaco.

Figura 4 (pag. siguiente). Facies más representativas de la Formación Vaca Muerta en las secciones Yesera del Tromen y Puerta Curaco. A) Patrón de apilamiento de facies de la primera secuencia compuesta (CS-1) en la sección Yesera del Tromen. B) Microbialita basal. C) Alternancia de margas y pelitas en facies de cuenca y rampa externa. D-E) Tobas reemplazadas por carbonatos. F-G) *Packstones/grainstones* intraclásticos, con abundantes bioclastos fragmentados.



Las facies de margas (Mr_h , $Mr_{b,h}$) y *packstones* intraclásticos laminados (P_lh) son similares a los de las facies previas. Contienen amonites, bivalvos articulados y desarticulados, en ocasiones fragmentados.

Los *packstones/grainstones* con estratificación entrecruzada de bajo ángulo y *hummocky* (PG_l , PG_lhcs), forman bancos tabulares de 20 a 30 cm de espesor. Las bases son generalmente netas y planas, aunque en ocasiones pueden presentar bases erosivas y superficies irregulares con gutter casts. La estratificación inclina 5° a 11° . Entre las láminas se desarrollan concentraciones bioclásticas de espesores milimétricos, compuestas de bivalvos recristalizados y bivalvos de composición calcítica (*Anopaea?*), gastrópodos y amonites.

Las tobas reemplazadas con estratificación entrecruzada *hummocky* ($Thcs$) presentan características texturales similares a las descritas en las asociaciones de facies anteriores aunque presentan ondulaciones dómicas de 20 a 30 cm de longitud de onda (Figura 4). La bioturbación está representada por *Planolites* y *Teichichnus* y puede aparecer de forma abundante entre la laminación/estratificación.

Interpretación

La facies 3 se interpreta como un ambiente de rampa media, por encima del nivel de olas de tormenta.

Los *packstones/grainstones* con estratificación entrecruzada de bajo ángulo (PG_l) y estratificación entrecruzada *hummocky* (PG_lhcs), así como los depósitos de tobas con estratificación entrecruzada *hummocky* de pequeña escala ($Thcs$), pueden ser interpretados como depósitos generados bajo la acción de flujos oscilatorios con una reducida componente unidireccional. En efecto, la presencia de fragmentos de bivalvos y moldes internos de gastrópodos sugiere condiciones de alta energía.

La intercalación de margas sugiere que la depositación ocurrió en un ambiente de baja energía que era episódicamente interrumpido por eventos de tormenta. Estas características permiten inferir que la depositación ocurrió en condiciones relativamente someras, aunque por debajo del nivel de base de olas de buen tiempo, por lo que esta facies se interpreta como el sector de la rampa media (entre el nivel de olas de tormenta y de buen tiempo).

Facies 4 (cuenca-talud)

Descripción

La facies 4 se compone de pelitas negras laminadas (Fl) entre las que se intercalan arenas muy finas laminadas (Sh) o con laminación ondulítica (Sr), con una relación pelita/arena de ~6:1. La facies 4 se reconoce solamente en los intervalos superiores de la sección del cerro Caicayen.

Las pelitas (Fl) son laminadas de color negro a gris oscuro, con espesores de 40 cm a 15 m. Contienen escasos bivalvos desarticulados y fragmentados, así como radiolarios espumelláridos

y material piroclástico. Las arenas finas son litoarenitas volcánicas laminadas que presentan ocasionalmente laminación ondulítica de corriente (Sh, Sr). Presentan geometría tabular y muestran espesores de 20 a 60 cm (Figura 5).

En conjunto las pelitas laminadas y las litoarenitas finas laminadas forman arreglos grano-crecientes y hacia el tope de la unidad la relación pelita/arena es cercana a 2:1, con ciclos grano-crecientes de espesores cercanos a los 2 m. Los niveles arenosos muestran cicatrices de arrastre y deslizamientos sinsedimentarios (Figura 5), con vergencia hacia el oeste.

Interpretación

Se interpreta que la facies 4 se depositó por debajo del nivel normal de olas de tormenta, en condiciones restringidas en oxigenación. Está dominada por procesos de decantación a partir de suspensión. Sin embargo la presencia de cicatrices de arrastre, así como deslizamientos sinsedimentarios sugieren la existencia de una pendiente, por lo que se interpreta que esta facies se depositó en sectores de cuenca a talud.

Las intercalaciones de areniscas finas laminadas y/o con laminación ondulítica de corriente pueden ser interpretadas como depósitos de corrientes de turbidez diluidas.

La escasa participación de partículas esqueléticas y trazas fósiles sugiere un ambiente distal, de baja energía y pobremente oxigenado. En efecto esta interpretación es consistente con la abundancia de radiolarios espumelláridos sobre los nasselláridos, indicando un ambiente de deposición marino distal.

Facies 5 (offshore a zona de transición)

Descripción

La facies 5 está integrada por bancos de pelitas laminadas (Fl) de color gris oscuro con escasas intercalaciones centimétricas de limos y arenas muy finas con laminación entrecruzada *hummocky* (Shcs), de color gris oscuro. Subordinadamente aparecen *wackestones* dolomitizados (WD) y *rudstones* bioclásticos (Rbm) (Figura 6). La relación pelita/arena es de ~6:1. Los bancos tienen geometría tabular con contactos basales planos netos. Esta facies está presente en las secciones Yesera del Tromen y Puerta Curaco.

Las pelitas son laminadas de color gris oscuro, con espesores de 40 cm a 5 m. Contienen escasas escamas de peces y raramente se encuentran bioturbadas. Subordinadamente aparecen bivalvos articulados (*Eriphyla sp.*) con orientación aleatoria.

Las limolitas están laminadas. Son de color gris oscuro, con espesores de 1 cm a 4 m y no presentan signos de bioturbación. Generalmente presentan un arreglo granocreciente que permite identificar parasecuencias dentro de esta facies. Por su parte las areniscas finas con estratificación entrecruzada *hummocky* forman bancos delgados de unos pocos centímetros (Figura 6). Las HCS pueden ser isótropas o anisótropas.

Interpretación

Se interpreta que la facies 5 se depositó por debajo del nivel normal de olas de tormenta, en condiciones restringidas en oxigenación. Está dominada por procesos de decantación a partir de suspensión. La laminación horizontal, así como el contenido de escamas de peces permite inferir que la sedimentación ocurrió principalmente por decantación en condiciones de baja energía. El color oscuro y la ausencia de bioturbación sugieren condiciones deficientes en oxígeno. La presencia de bivalvos articulados sugiere la reelaboración de los mismos a partir de episodios de tormenta.

La intercalación episódica de las facies de areniscas con estratificación entrecruzada *hummocky* indica que la depositación ocurrió asociada a la instalación de una zona erosiva relacionada con la acción de tormentas en áreas más someras, que promovieron la exportación del material sedimentario como flujos tempestíuticos. Por lo tanto se interpreta a la facies 5 como sectores de cuenca a zona de transición.

Facies 6 (Shoreface)

Descripción

La facies 6 está integrada por bancos de pelitas laminadas (Fl) de color gris oscuro que se intercalan con bancos decimétricos de areniscas finas a medianas con laminación ondulítica de corriente (Sr) y de oleaje (Srw), así como areniscas con estratificación entrecruzada *hummocky* (Shcs). La una relación pelita/arena es de ~3:1. Los bancos tienen geometría tabular con contactos basales netos. La facies 6 está presente en las secciones Yesera del Tromen y Puerta Curaco (Figura 6).

Las pelitas son laminadas de color gris oscuro, con espesores de 40 cm a 1 m. Contienen abundantes bivalvos articulados (*Eriophyla*, *Steimannella* y *Panopaea*) en posición de vida (Figura 6)

Las areniscas con estratificación entrecruzada *hummocky*, así como con laminación ondulítica de corriente y de oleaje, forman bancos decimétricos (20-50 cm) de geometría tabular (Figura 5). Las trazas son abundantes y diversas, incluyendo elementos de las icnofacies de Cruziana y de Skolithos: *Gyrochorte*, *Asteriacites*, *Teichichnus* y *Planolites*, entre otras.

Interpretación

La facies 6 se interpreta como un subambiente de *shoreface*. Los bancos arenosos con laminación ondulítica de corriente y oleaje se interpretan como depósitos generados por encima del nivel de olas de buen tiempo. Por el contrario, los bancos arenosos con estratificación entrecruzada *hummocky* se interpretan como depósitos generados bajo la acción de flujos oscilatorios durante eventos de tormenta. Aunque debe tenerse en cuenta que las estructuras HCS pueden ser también generadas a partir de la perturbación del cuerpo de agua a lo largo de interfaces internas con diferentes densidades (ondas internas).

La presencia de elementos de las icnofacies de Cruziana y Skolithos sugiere dos regímenes de colonización, uno generado durante los estadios de buen tiempo y otro controlado por eventos de tormentas (icnofacies de mezcla).

Asociación de facies A: rampa mixta

La asociación de facies A incluye las facies 1 (rampa externa restringida a cuenca), 2 (rampa externa) y 3 (rampa media). Corresponde a un ambiente de rampa mixta (carbonático / volcanoclástico) con influencias de oleaje de tormenta. La falta de evidencias de la presencia de un talud, permiten interpretar a la asociación de facies A como un sistema de rampa homoclinal cuyas facies más proximales están relacionadas con la progradación los depósitos de la Formación Quintuco (Mitchum y Uliana, 1985, Carozzi *et al.*, 1993).

Las facies 1 (rampa externa restringida a cuenca) y 2 (rampa externa) representan la faja de facies que se encuentra por debajo del nivel de olas de tormenta, mientras que las facies 3 (rampa media) se ubica por encima de esta interface.

El alto contenido de material volcanoclástico (tobas reemplazadas) indica que la actividad del arco volcánico era realmente intensa. En efecto, las tobas reemplazadas aparecen como flujos turbidíticos en las facies 1 y 2, y como tempestitas con estratificación entrecruzada *hummocky* en la facies 3. Si bien aparecen depósitos tobáceos y lapillitas de caída, efectivamente el material piroclástico se depositó asociado a los procesos hidrodinámicos del sistema depositacional.

Es importante destacar que la interface del nivel de olas de tormenta, si bien marca un cambio en la litofacies, no genera un cambio sustancial en el patrón de apilamiento ni en las proporciones litológicas respecto de los depósitos de rampa externa. Esto sugiere un ambiente de baja energía con desarrollo de tormentas de moderada intensidad, probablemente relacionadas con el reducido fetch de la cuenca. En este sentido, los depósitos de rampa media pueden ser interpretados como facies relativamente someras depositadas por encima de los 50 m de profundidad (ver discusión en Kietzmann y Palma, 2011).

Asociación de facies B: Plataforma mixta

La asociación de facies B incluye las facies 4 (cuenca-talud), 5 (*offshore*-zona de transición) y 6 (*shoreface*). Corresponde a un ambiente de plataforma mixta silicoclástico/carbonático con influencias de oleaje de tormenta y generación de clinoformas con desarrollo de talud.

La asociación de facies B corresponde a las progradaciones de facies asignadas a la Formación Quintuco. La facies 4 (cuenca-talud) está desarrollada únicamente en la parte media y superior de la sección Cerro Caicayén, mientras que las facies 5 (*offshore*-zona de transición) y 6 (*shoreface*) caracterizan la parte superior de las secciones Yesera del Tromen y Puerta Curaco.

Las facies 4 (cuenca-talud) y 5 (*offshore*-zona de transición) representan la faja de facies que se encuentra por debajo del nivel de olas de tormenta, o cercana a esta interface, mientras que las facies 6 (*shoreface*) se ubica por encima del nivel de olas de buen tiempo.

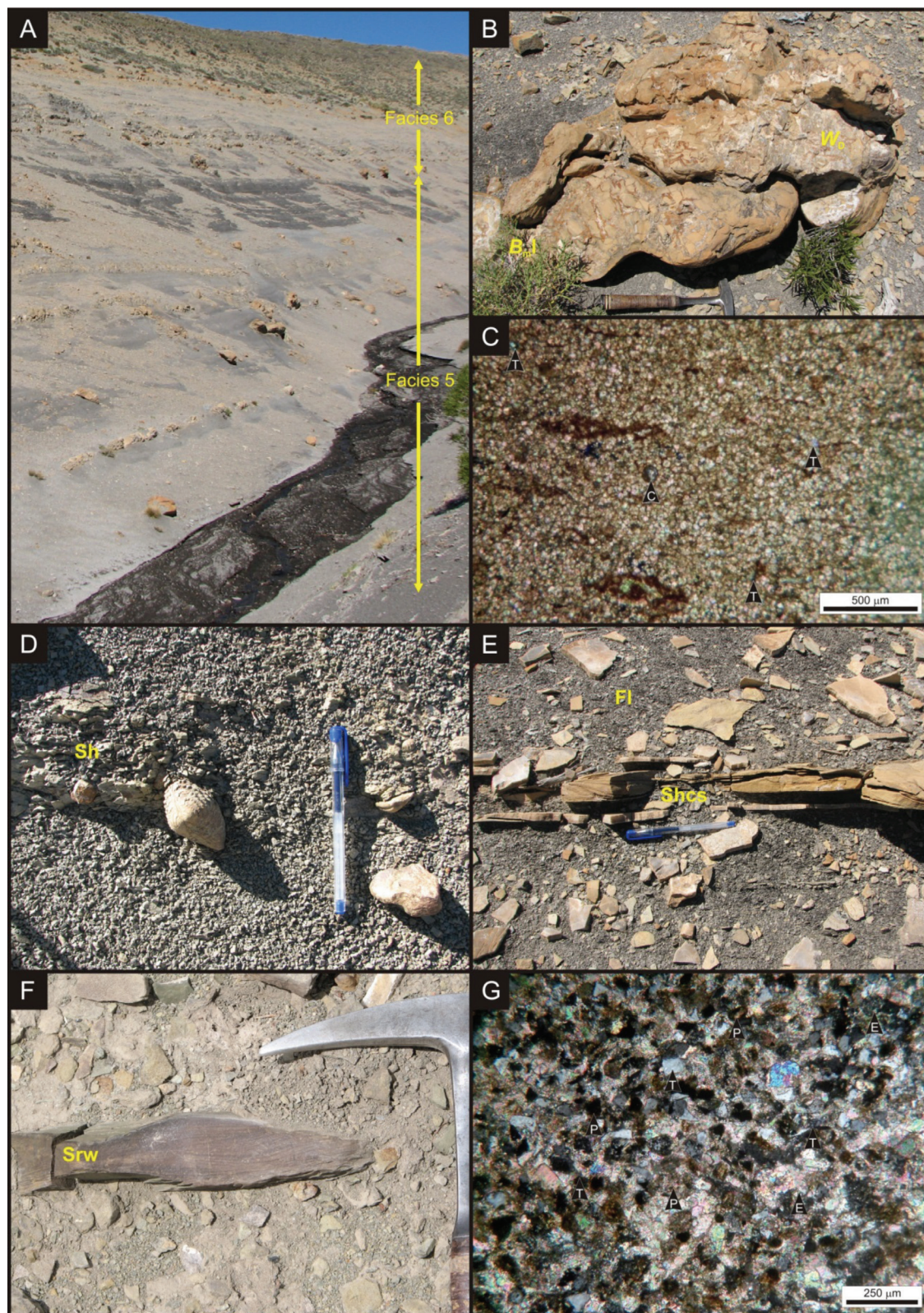


Figura 5. Facies más representativas de la Formación Quintuco en las secciones Yesera del Tromen y Puerta Curaco. A) Facies 5 (*offshore*-transición) y 6 (*shoreface*) en la sección Yesera del Tromen. B-C) Niveles con concreciones dolomíticas en septarios. D) Areniscas laminadas con bivalvos en posición de vida. E) Areniscas con estratificación entrecruzada *hummocky* de pequeña escala. F-G) Areniscas líticas con laminación ondulítica de oleaje.

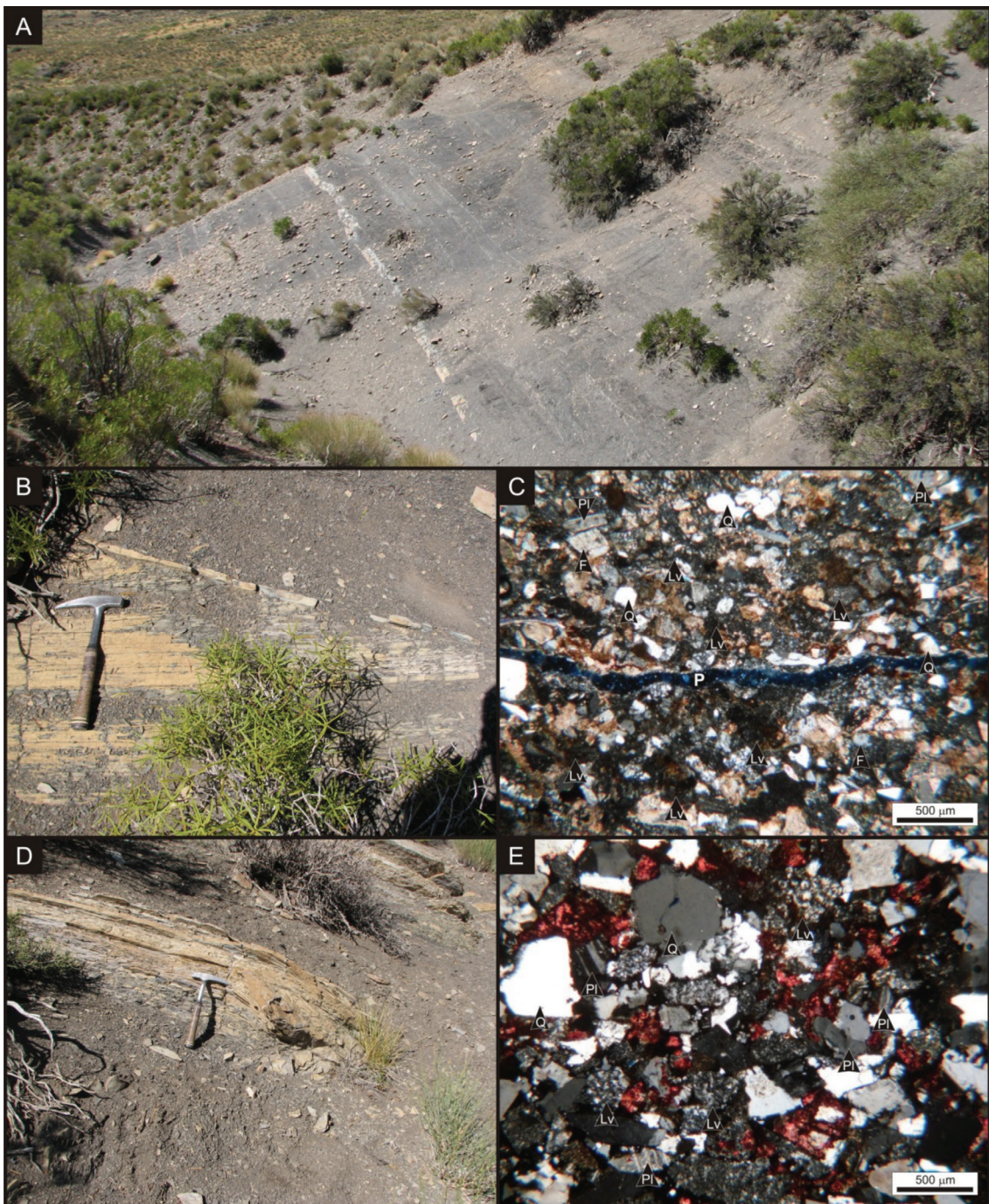


Figura 6. Facies más representativas de la Formación Vaca Muerta en la sección Cerro Caicayen. A) Facies de cuenca-talud (facies 4) mostrando pelitas negras con alternancia de limolitas y areniscas finas laminadas en el tramo tithoniano de la sección. B-C) Cicatrices de deslizamientos sinsedimentarios en facies de areniscas finas laminadas en el tramo Berriasiano superior – Valanginiano inferior. D-E) Pliegues sinsedimentarios en facies de areniscas finas laminadas en el tramo Berriasiano superior – Valanginiano inferior.

La presencia de la facies 4 indica que las clinoformas desarrollaron pendientes más inclinadas que permitieron el desarrollo de un talud. Asimismo cabe destacar que la asociación de facies B se caracteriza por una participación claramente superior de material silicoclástico respecto del car-

bonático, mostrando un cambio paleoambiental importante respecto de la asociación de facies A.

Al igual que en la asociación de facies A, el pasaje entre las facies de *offshore*-transición al *shoreface* es notoriamente transicional, sugiriendo un ambiente relativamente somero y de baja energía. La falta de un desarrollo contundente de facies de *shoreface* inferior sugiere que el ambiente estaba influenciado por oleaje de tormenta, pero que dominaban las condiciones de buen tiempo.

ASOCIACIÓN DE MINERALES EN MARGAS Y PELITAS

Las asociaciones minerales encontradas en margas y pelitas son muy similares. En general, el cuarzo es el componente más abundante (16 a 63%, media ~ 34%), seguido por la plagioclasa (1 a 28%, media ~ 20%). La calcita muestra una correlación inversa respecto del cuarzo, con un contenido variable de 0 a 51%. De manera subordinada (entre el 5 y el 25%) aparece yeso de origen diagenético, que se restringe a los niveles inferiores y medios de las secciones analizadas.

El contenido de arcillas es variable, presentando entre 3 y 20% para la Formación Vaca Muerta y 20 a 40% para la Formación Quintuco. Las asociaciones se componen por illita, illita/esmectita y clorita con posible presencia de caolinita en escasas muestras. La composición de la fracción menor de 2 µm es monótona, dominada por illita e illita/esmectita. Además, hay presencia prácticamente constante aunque en proporciones variables de clorita y en niveles puntuales podría haber ocurrencia de caolinita. En la base de la Formación vaca Muerta, se observa un contenido discreto de clorita asociado a illita con escasa o nula participación de illita/esmectita, en tanto que hacia los niveles altos de dicha unidad, se reconoce la ocurrencia de illita/esmectita como especie dominante y clorita muy escasa.

En la Formación Quintuco se observa un continuo enriquecimiento en illita con respecto a la illita/esmectita. Los picos además son más agudos, indicando mejor cristalinidad. Podría tratarse de un aumento en micas detríticas, consistente con la abundancia de este mineral en areniscas asociadas.

La abundancia relativa de illita/esmectita, puede correlacionarse con etapas de volcanismo explosivo intenso, con alta provisión de vidrio que puede alterarse a dichas arcilla. Por el contrario, el enriquecimiento en illita o minerales micáceos de buena cristalinidad, podría indicar la relación con aporte detrítico consistente con la mineralogía de las arenas asociadas.

ANÁLISIS ESTRATIGRÁFICO SECUENCIAL

En esta área se reconocen cinco grandes ciclos transgresivo-regresivos o secuencias compuestas, que contienen trece secuencias depositacionales de alta frecuencia (Figura 7).

La primera secuencia compuesta (CS-1) se inicia con la superficie de inundación regional que caracteriza la base de la Formación Vaca Muerta (RFS-1). Se extiende desde la Zona de *Virgatospinctes mendozanus* (Tithoniano inferior alto) en la base de la unidad, hasta la parte inferior de la Zona de *Windhausenicerias internispinosum* (Tithoniano superior bajo). Contiene 3 secuencias depositacionales de alta frecuencia (HFS 1, 2 y 3). En las secciones Yesera del Tromen y Puerta Curaco comienza con facies de rampa externa (facies 2) y progresivamente se profundiza con un arreglo netamente retrogradante, pasando a facies de rampa externa restringida a cuenca (facies 1), para luego pasar nuevamente a facies de rampa externa (facies 2) y finalmente a facies de rampa media (facies 3). En la sección Cerro Caicayén se encuentra en facies de cuenca (facies 1).

La segunda secuencia compuesta (CS-2) se inicia con la superficie de inundación regional RFS-2 que caracteriza la parte superior de la Zona de *Windhausenicerias internispinosum* (Tithoniano superior bajo) y se extiende hasta la Zona de *Substeueroceras koeneni* (Tithoniano superior alto – Berriasiano inferior). Contiene 3 secuencias depositacionales de alta frecuencia (HFS 4, 5 y 6). En las secciones Yesera del Tromen y Puerta Curaco se caracteriza por facies de rampa externa (facies 2), que progresivamente se somerizan pasando a facies de rampa media (facies 3). En la sección Cerro Caicayén se encuentra en facies de cuenca (facies 1).

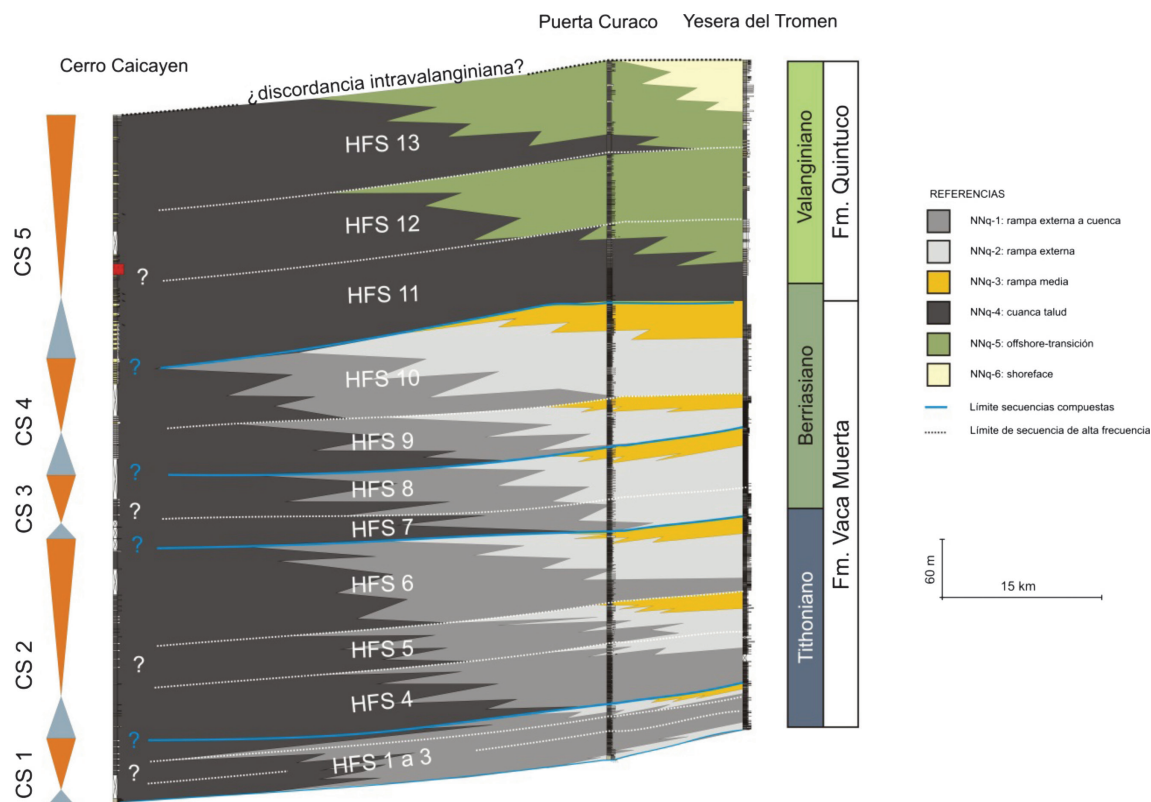


Figura 7. Correlación de facies y secuencias entre las secciones Yesera del Tromen, Puerta Curaco y Cerro Caicayén. Referencias: (CS) secuencias compuestas, (HFS) secuencias de alta frecuencia.

La tercera secuencia compuesta (CS-3) se inicia con la superficie de inundación regional RFS-3 que se ubica dentro de la Zona de *Substeueroceras koeneni* (Tithoniano superior alto – Berriasiano inferior) y se extiende hasta la Zona de *Spiticerias damesi* (Berriasiano superior). Contiene 2 secuencias depositacionales de alta frecuencia (secuencias 7 y 8). En las secciones Yesera del Tromen y Puerta Curaco se caracteriza por facies de rampa externa (facies 2), que progresivamente se somerizan pasando a facies de rampa media (facies 3). En la sección Cerro Caicayén se encuentra en facies de cuenca (facies 4).

La cuarta secuencia compuesta (CS-4) se inicia con la superficie de inundación regional RFS-4 que se encuentra dentro de la Zona de *Spiticerias damesi* (Berriasiano superior) y se extiende hasta la parte más alta de esta zona. Contiene 2 secuencias de alta frecuencia (HFS 9 y 10). En las secciones Yesera del Tromen y Puerta Curaco se caracteriza por facies de rampa externa (facies 2) y rampa media (facies 3). En la sección Cerro Caicayén se encuentra en facies de cuenca (facies 4).

La quinta secuencia compuesta (CS-5) se inicia con la superficie de inundación regional RFS-5 que se encuentra en la parte más alta de la Zona de *Spiticerias damesi* (Berriasiano superior) y se extiende hasta la Zona de *Olcostephanus (O.) atersthoi* (Valanginiano inferior). Contiene 3 secuencias de alta frecuencia (HFS 11, 12 y 13). En las secciones Yesera del Tromen y Puerta Curaco se caracteriza por facies de *offshore*-zona de transición (facies 5) y *shoreface* (facies 6), mientras que en la sección Cerro Caicayén se encuentra en facies de cuenta-talud (facies 4).

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 los tramos transgresivos de las secuencias compuestas están enriquecidos en cuarzo y minerales de arcilla, mientras que los cortejos de mar alto se enriquecen en calcita. Este comportamiento se repite en las primeras cuatro secuencias compuestas (CS-1 a 4), invirtiéndose en la secuencia CS-5, correspondiente a la Formación Quintuco, donde el sistema se vuelve predominantemente clástico.

CONCLUSIONES

En esta área de Chos Malal (secciones Yesera del Tromen, Puerta Curaco y Cerro Caicayén) se reconocieron 2 asociaciones de facies. La asociación de facies A representa un sistema de rampa mixta y está representada por facies de cuenca a rampa externa restringida (facies 1), rampa externa (facies 2) y rampa media (facies 3). La asociación de facies B representa un sistema de plataforma mixta y contiene facies de cuenca-talud /facies 4), cuenca a zona de transición (facies 5) y *shoreface* (facies 6).

Desde el punto de vista estratigráfico secuencial se reconocieron cinco secuencias compuestas (CS-1 a 5) que contienen trece secuencias depositacionales de alta frecuencia (HFS-1 a 13). Se

observa un enriquecimiento en cuarzo y arcillas en los cortejos transgresivos, y un incremento en el contenido de calcita en los cortejos de mar alto.

AGRADECIMIENTOS

Se desea agradecer a Shell Exploration and Production Company por permitir la publicación de los resultados presentados en este trabajo. Así como a Sebastian Paulin por la colaboración en las tareas de campo. Esta es la contribución C-79 del Instituto de Estudios Andinos “Don Pablo Groeber”.

REFERENCIAS CITADAS

- Cangini, J. 1968. Perfiles estratigráficos desde la Sierra de la Vaca Muerta hasta Buta Ranquil-Los Menucos. Dto. Picunches, Loncopue, Ñorquin, Chos Malal y Pehuenches. Neuquén. YPF Informe Interno (Inédito).
- 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.
- Dunham, R.J. 1962. Classification of carbonate rocks according to depositional texture. *American Association of Petroleum Geologists, Memoir* 1: 108-121, Tulsa.
- Embry, A.F. y Klován, J.E. 1971. A late Devonian reef tract on northeastern Banks Island Northwest Territories. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology* 19: 730-781.
- Kietzmann, D.A. y Palma, R.M. 2009. Tafofacies y biofacies de la Formación Vaca Muerta en el sector surmendocino de la Cuenca Neuquina: implicancias paleoecológicas, sedimentológicas y estratigráficas. *Ameghiniana* 46: 321-343.
- 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. y Vennari, V.V. 2013. Sedimentología y estratigrafía de la Formación Vaca Muerta (Tithoniano-Berriasiano) en el área del cerro Domuyo, norte de Neuquén, Argentina. *Andean Geology* 40(1): 41-65.
- 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.
- 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 Picun Leufú, Provincia del Neuquén, República Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 28: 97-132.
- 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.
- Leanza, H.A., Hugo, C.A. y Repol, D. 2001. Hoja Geológica 3969-I, Zapala. Provincia del Neuquén. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino. Boletín 275: 1-128, Buenos Aires.
- Leanza, H.A., Hugo, C.A. y Salvarredy Aranguren, M. 2003. Miembro Huncal (Berriasiano inferior): un episodio turbidítico en la Formación Vaca Muerta, Cuenca Neuquina, Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 58: 248-254.
- 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.
- Marchese, H.G. 1971. Litoestratigrafía y variaciones litofaciales de las sedimentitas mesozoicas de la Cuenca Neuquina, Prov. de Neuquén, Rep. Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 36: 343-410.
- 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.
- Spalletti, L., Z. Gasparini, G. Veiga, E. Schwarz, M. Fernández y S. Matheos 1999. Facies anóxicas, procesos deposicionales y herpetofauna de la rampa marina titoniano-berriasiana en la Cuenca Neuquina (Yesera del Tromen), Neuquén, Argentina. *Revista Geológica de Chile* 26:109-123.
- Spalletti, L.A., Veiga, G.D., Schwarz, E. y Franzese, J. 2008. Depósitos de flujos gravitacionales sub-ácueos de sedimentos en el flanco activo de la Cuenca Neuquina durante el Cretácico Temprano. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 63: 442-453.
- Weaver, C. 1931. Paleontology of the Jurassic and Cretaceous of West Central Argentina. Memoir University of Washington 1, 469 p., Seattle.