

PALEOGEOGRAFÍAS REFINADAS Y ACTUALIZADAS DEL INTERVALO PILMATUÉ-AGRIO INFERIOR-CENTENARIO INFERIOR

E. Schwarz¹ y G.D. Veiga¹

1: Grupo SED, Centro de Investigaciones Geológicas (Universidad Nacional de La Plata-CONICET). Diagonal 113 #256
B1904DPK, La Plata, Argentina. eschwarz@cig.museo.unlp.edu.ar, veiga@cig.museo.unlp.edu.ar

Palabras clave: Intervalo Agrio-Centenario, Integración y correlación regional, Reservorios Convencionales y No Convencionales, Cuenca Neuquina

ABSTRACT

Refined and updated paleogeography of the Pilmatué-Lower-Agrio-Lower Centenario stratigraphic interval.

This contribution presents a series of paleographic reconstructions for the Pilmatué-Lower Agrio-Lower Centenario stratigraphic interval, based on the integration of a large dataset covering from the Andean sector to the eastern subsurface region. It also builds upon a large body of recently published literature describing different facies associations and depositional systems within the study interval. Additional long-term stacking patterns and key stratigraphic surfaces allowed identifying three main transgressive-regressive depositional sequences within the unit that are tied to biostratigraphic and absolute ages. The resulting paleogeographic reconstructions presented in this work include characteristics and lateral relationships of different depositional systems, distribution and mixing mechanisms of siliciclastics and carbonates in the marine settings, as well as inferred oxygen levels of distal marine sediments based on geochemical proxies. The paleogeographic reconstructions also discriminate between maximum transgression and maximum regression of different sequences, allowing for direct estimation of shoreline migration overtime. These refined and updated paleogeographies can be used firstly to discuss and revise some previous paleogeographical models. Secondly, they can be incorporated to build more robust exploration or production models for conventional and unconventional (tight and shale) reservoirs that occur within the stratigraphic interval.

INTRODUCCIÓN

El intervalo estratigráfico Pilmatué-Agrio Inferior-Centenario Inferior (Valanginiano Superior – Hauteriviano Inferior) ha sido foco de abundantes estudios sedimentológicos, secuenciales, paleontológicos y bioestratigráficos para comprender la naturaleza y evolución del Mar Neuquino durante el Cretácico Temprano, pero también debido a su interés como portador de potenciales rocas madre y reservorios de distinta naturaleza. A grandes rasgos, se conoce desde hace mucho tiempo que este intervalo representa sucesiones enteramente continentales en el extremo este (Uliana *et al.* 1977; Digregorio y Uliana 1980), y sucesiones mayormente marinas distales de grano

fino en el sector occidental de afloramientos (Spalletti *et al.* 2011). Sin embargo, en la última década se han reportado abundantes estudios de afloramientos y subsuelo donde se caracterizan depósitos asignados a distintos ambientes marinos someros (deltaicos y de *shoreface*), así como depósitos relativamente gruesos acumulados en ambientes de *offshore*. Estos nuevos estudios requieren ser incorporados al conocimiento previo para lograr reconstrucciones paleogeográficas más detalladas y actualizadas del intervalo estratigráfico aquí considerado.

En este trabajo se presenta la integración de un gran cúmulo de información de afloramiento (20 localidades) y de subsuelo (200 pozos clave, +1000 m de testigos de corona), que permitió realizar una revisión y puesta al día del intervalo estratigráfico conocido como Miembro Pilmatué-Miembro Agrio Inferior-Miembro Centenario Inferior a lo largo de gran parte de la extensión de la Cuenca Neuquina (Fig. 1). Esa información se utilizó para definir los principales sistemas de acumulación y su distribución en el espacio, y posteriormente para definir la evolución de dichos sistemas en el tiempo, mediante la combinación de un ajustado marco bioestratigráfico y un esquema estratigráfico secuencial conformado por tres secuencias depositacionales principales (Secuencias Inferior, Media y Superior).

Las reconstrucciones paleogeográficas generadas para diferentes estadios de estas tres secuencias incluyen la caracterización de los sistemas de acumulación operantes, los mecanismos de distribución y mezcla de sedimentos silicoclásticos y carbonáticos en distintos ambientes, así como las condiciones de oxigenación de los fondos marinos en distintos contextos. Estas paleogeografías refinadas y actualizadas permiten revisar y cuestionar algunas de las utilizadas hasta la actualidad, y pueden servir de base para avanzar en estudios detallados de reservorios convencionales y no convencionales (tight y shale).

MARCO GEOLÓGICO Y ESTRATIGRÁFICO

La Cuenca Neuquina (Fig. 1) es considerada una cuenca de retroarco, desarrollada en el centro-oeste de la Argentina, cuyo relleno pertenece principalmente al lapso Jurásico-Cretácico (Howell *et al.* 2005). Está limitada al oeste por el cordón andino y al este por el Bloque de la Sierra Pintada (noreste) y el Macizo Nordpatagónico. La Cuenca Neuquina se ha desarrollado como un depocentro sedimentario desde el Triásico superior al Paleoceno (Howell *et al.* 2005).

La Formación Agrio (denominación introducida por Weaver 1931) constituye la más joven de las unidades del Mendociano o Grupo Mendoza (Fig. 2). Se apoya mediante una importante superficie transgresiva de desarrollo regional sobre los términos clásticos (continentales, transicionales y marinos) de la Formación Mulichinco (Schwarz *et al.* 2006), y es cubierta por los depósitos carbonáticos, clásticos y evaporíticos de la Formación Huitrín (Fig. 2). El mayor desarrollo vertical y sus afloramientos característicos se registran a lo largo del sector andino (occidental) de la Cuenca Neuquina, en donde el espesor de la unidad puede alcanzar los 1200 m (Spalletti *et al.* 2011).

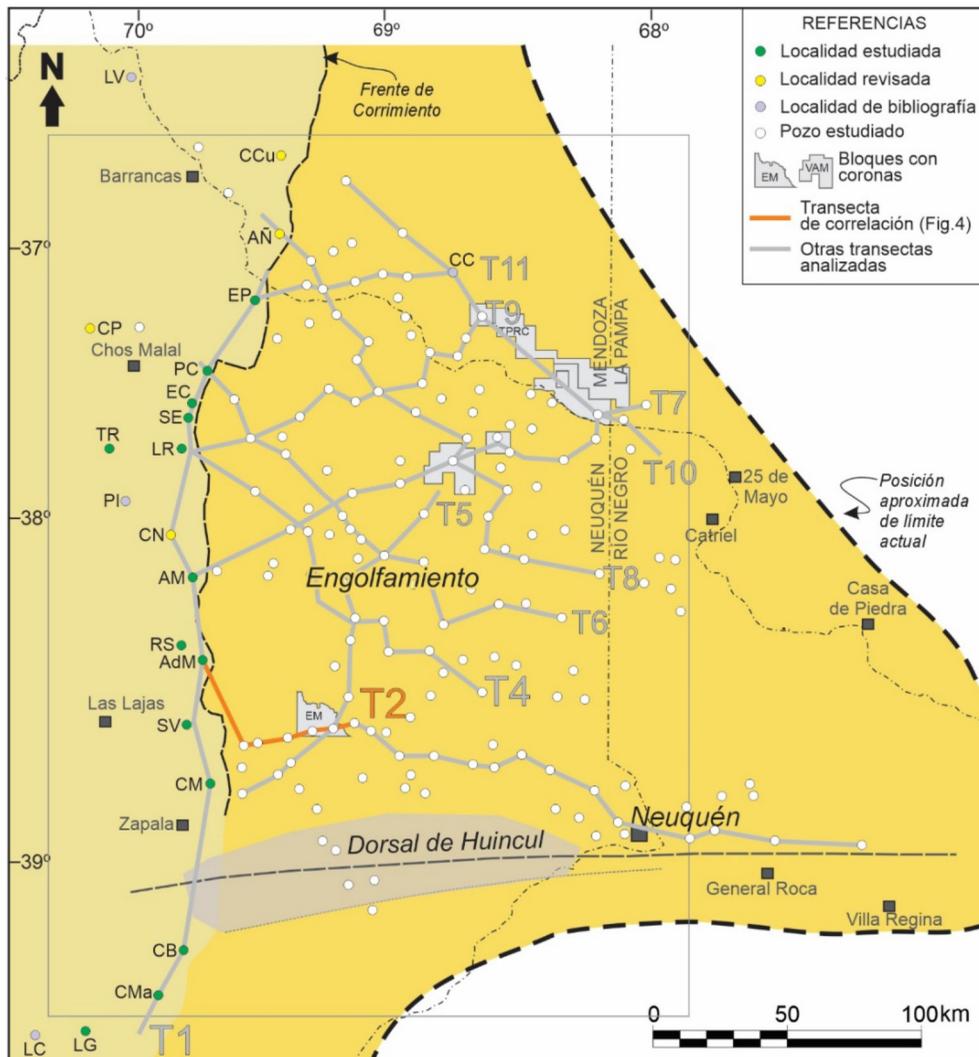


Figura 1. Mapa de ubicación. Se indican las localidades y pozos clave utilizados en este trabajo. También transectos de correlación que vinculan a los distintos datos. El recuadro gris indica la ubicación de los mapas presentados en figura 6. Nombres de localidades: AdM: Agrío del Medio; AM: Agua de la Mula; AÑ: Agua del Ñaco; CB: Cerro Birrete; CC: Cerro Corrales; CCu: Cara Cura; CN: Casa Nuestra; CM: Cerro Mesa; CMa: Cerro Marucho; CP: Casa de Piedra; EC: Escuela Curaco; EP: El Portón; LC: Las Coloradas; LG: Los Galpones; LR: Loma Rayoso; PC: Puerta Curaco; PI: Pichaihue; RS: Río Salado; SE: San Eduardo; SV: Sierra de la Vaca Muerta. Nombre de áreas de subsuelo: EM: El Mangrullo, VAM: Volcán Auca Mahuida, TPRC: Tren Productivo Río Colorado.

La Formación Agrío suele dividirse en tres miembros: Inferior, Avilé y Superior (Fig. 2). Los miembros inferior y superior en afloramiento están conformados mayoritariamente por potentes sucesiones de fangolitas silicoclásticas oscuras, con proporciones menores de margas y fangolitas calcáreas, acumuladas en ambientes marinos (Spalletti *et al.* 2011). Estas dos unidades han sido red denominadas formalmente como miembros Pilmatué y Agua de la Mula, respectivamente (Leanza y Hugo 2001). Si bien los depósitos finos dominan en amplios sectores de afloramientos, para ambas unidades se registra un rápido incremento hacia el este de depósitos arenosos (Echevarria *et al.* 2022). En la parte media de la Formación Agrío aparece un intervalo distintivo

conocido como Miembro Avilé o Arenisca Avilé (Weaver 1931). Esta unidad silicoclástica está compuesta principalmente por depósitos de origen continental, caracterizada por la acumulación de depósitos fluviales, eólicos y lacustres (Veiga *et al.* 2007, Veiga *et al.* 2011).

La Formación Centenario surgió en los 70' como una unidad conformada mayormente por depósitos clásticos continentales, que abarcaba cronológicamente un intervalo más amplio que la Formación Agrio (Digregorio 1972; Uliana *et al.* 1977). Digregorio y Uliana (1980) sugieren que la unidad en sectores marginales se apoyaba mayormente sobre facies marino-marginales de la Formación Loma Montosa y era temporalmente equivalente a la sucesión integrada por las unidades Mulichinco, Agrio y Rayoso desarrolladas hacia el oeste. Recientemente se ha podido establecer con mayor precisión cuál es el intervalo estratigráfico que en amplios sectores del subsuelo se corresponde con los miembros Agrio Inferior y Agrio Superior de la Formación Agrio (Vergani *et al.* 2001; Echevarria *et al.* 2022). En este trabajo se integran para las reconstrucciones paleogeográficas al intervalo sólo considerado como Centenario Inferior según este nuevo criterio (Echevarria *et al.* 2022), es decir constituido por los depósitos que se apoyan sobre facies de la

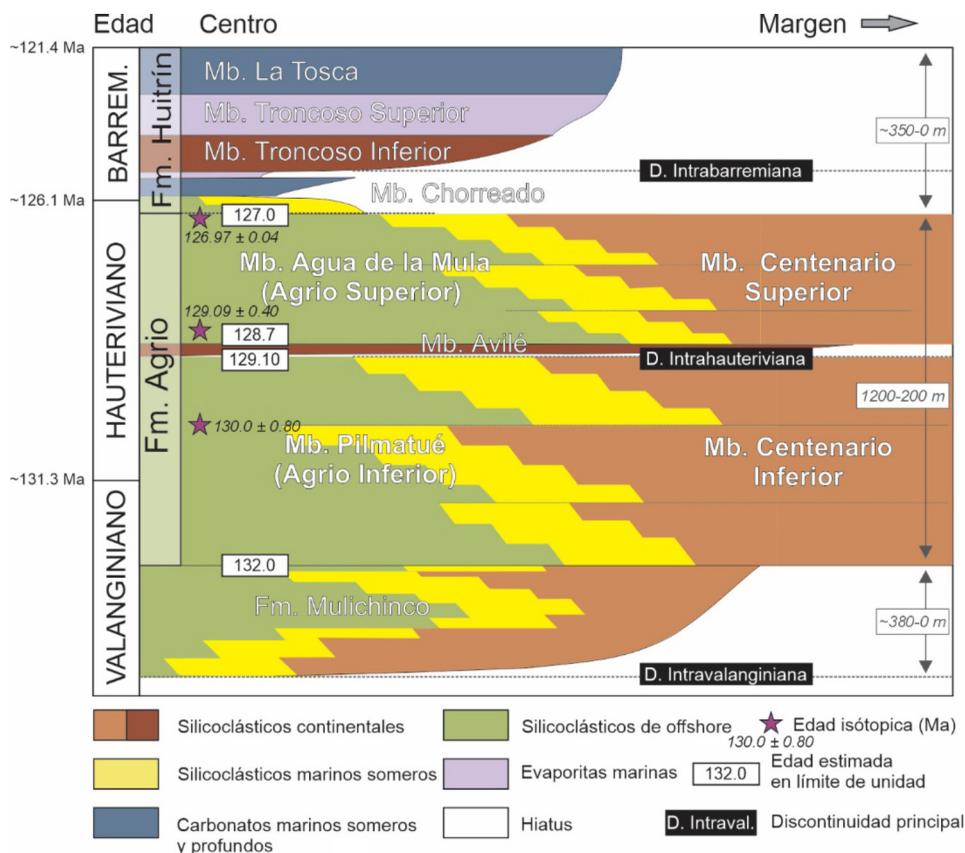


Figura 2. Esquema cronoestratigráfico para las formaciones Mulichinco, Agrio y Huitrín, modificado de Schwarz *et al.* (2021). Se indica también las principales discontinuidades y una estimación de espesores máximos en centro de cuenca y su reducción hacia los márgenes. La Formación Agrio posee una muy buena resolución temporal (detalles de edades radimétricas en Schwarz *et al.* 2021), que contrasta con la baja resolución de las otras unidades. Edades límites de Valanginiano y Hauteriviano según Aguirre-Urreta *et al.* (2019).

Formación Mulichinco o la Formación Loma Montosa y son cubiertos a su vez por depósitos del Miembro Centenario Superior, donde el Miembro Avilé no está presente (Fig. 2).

ESTRATIGRAFÍA DEL INTERVALO DE ESTUDIO

El intervalo estratigráfico aquí considerado (Pilmatué-Agrio Inferior-Centenario Inferior, Fig. 3) ha sido foco de abundantes estudios sedimentológicos, secuenciales, paleontológicos y bioestratigráficos, así como de su utilidad y potencialidad como productor de hidrocarburos. A grandes rasgos, se conoce desde hace tiempo que la unidad representa sucesiones continentales en el extremo este (Uliana *et al.* 1977; Digregorio y Uliana 1980), en tanto está conformada mayormente por fangolitas de *offshore* a cuenca en el sector de afloramientos, con un claro incremento de la proporción de fango carbonático hacia el norte (Spalletti *et al.* 2011) (Fig. 3). Más recientemente se han reportado depósitos asignados a distintos ambientes marinos someros (deltaicos y de *shoreface*), así como depósitos relativamente gruesos acumulados en ambientes de *offshore* (Fig. 3) que se detallan más adelante en este trabajo. Estos nuevos estudios requieren ser incorporados al conocimiento previo para lograr reconstrucciones paleogeográficas más detalladas y actualizadas del intervalo estratigráfico.

El intervalo Pilmatué-Agrio Inferior-Centenario Inferior posee espesores máximos de 700 m en el sector andino y valores de 400 a 300 m de potencia en amplias regiones de subsuelo. En las zonas cercanas a la ciudad de Neuquén su espesor se reduce a unos 200 m (Echevarria *et al.* 2022), valores similares, aunque con depósitos muy diferentes, a los que posee en el sector conocido como Subcuenca de Picún Leufú al sur de la Dorsal de Huincul (Fig. 1). Los mínimos valores de espesor se registran en el sector del Tren Productivo Río Colorado (TPRC), donde la unidad no supera los 100 m (Iñigo *et al.* 2019). En el eje de la Dorsal de Huincul la unidad no está presente, pero ese caso es mayormente por erosión asociada a eventos de exhumación posteriores, ya que el Grupo Neuquén apoya sobre depósitos jurásicos.

La zonación de amonites del intervalo estudiado ha permitido un refinamiento bioestratigráfico muy detallado para este intervalo, para el cual actualmente se definen cuatro zonas de amonites: *Pseudofavrella angulatiformis*, *Holcoptychites neuquensis*, *Hoplitocrioceras gentilii* y *Weavericeras vacaense* (Aguirre-Urreta *et al.* 2019). A su vez, las dos primeras zonas se dividen en tres subzonas: *P. angulatiformis*, *C. ornatum* *D. crassicostratus* la primera, y *H. neuquensis*, *H. agrioensis* y *O. (O.) laticosta*, la segunda. En forma adicional, este refinado esquema bioestratigráfico fue integrado con edades absolutas (Fig. 2), que permitieron no solo establecer con precisión que el intervalo estratigráfico abarca parte del Valanginiano tardío y el Hauteriviano temprano, sino que su duración absoluta no superaría los 3 millones de años.

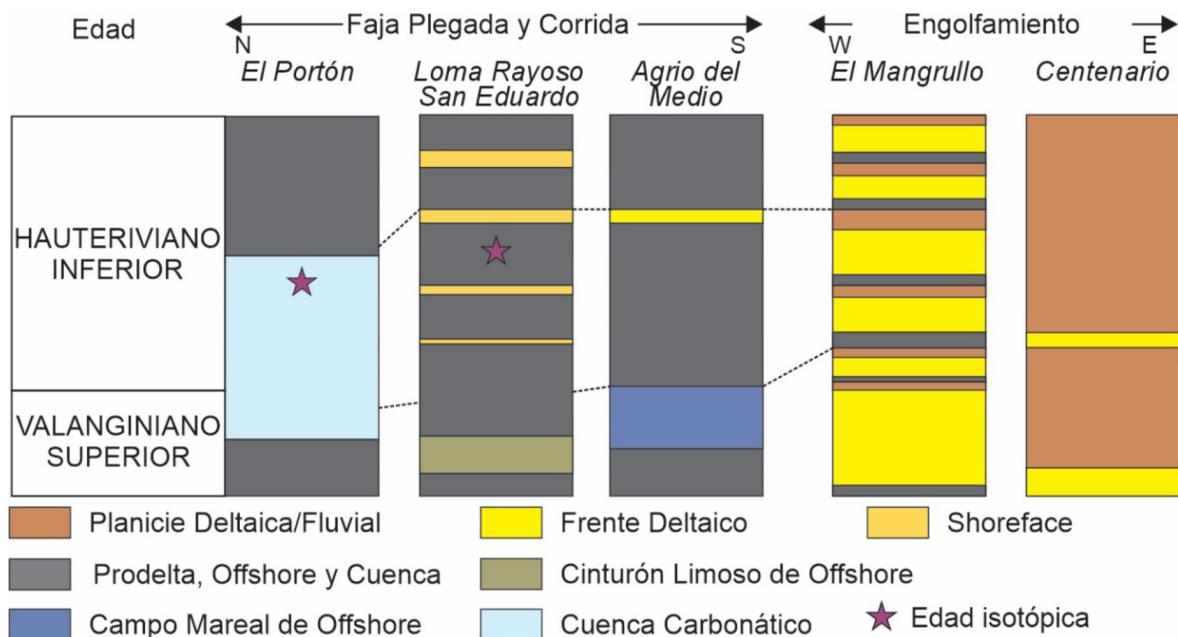


Figura 3. Características paleoambientales generales del intervalo estudiado (modificado de Schwarz *et al.* 2021).

METODOLOGÍA

Este trabajo de revisión y actualización sobre la evolución paleogeográfica de Agrio y Centenario Inferior cubre gran parte de la extensión de la Cuenca Neuquina excepto la región de Mendoza central (área de Malargüe) y más al norte. Así, se nutre de información de afloramientos desde Las Coloradas en el sur de la Provincia de Neuquén hasta la Sierra de Reyes y Cara Cura ya en Mendoza por el norte, e incluye unas 20 localidades principales (Fig. 1). Esta información se combina con datos de subsuelo de unos 200 pozos clave que disponen de adecuado registro de perfiles y descripción litológica para su análisis. Su distribución abarca gran parte de Neuquén, pero también el oeste de Río Negro, suroeste de La Pampa y sur de Mendoza (Fig. 1).

Un elemento clave adicional lo constituye el abundante significativo material de testigos de corona disponible para la unidad. De los casi ca. 1000 m disponibles para este trabajo, la mitad se encuentra en el bloque El Mangrullo (Fig. 1) que representa un yacimiento muy importante de producción de gas en areniscas tight del Miembro Pilmatué o Agrio Inferior (Echevarria y Schwarz 2021). Alrededor de 100 m provienen de los bloques Volcán Auca Mahuida y Señal Cerro Bayo, el cual constituye un yacimiento de petróleo liviano con variable historia de producción (Delpino *et al.* 2014). Una importante porción proviene además del Tren Productivo Río Colorado, donde la unidad, aunque delgada (< 100 m), es una importante productora de petróleos pesados (Iñigo *et al.* 2019). El resto se compone de tramos delgados (< 18 m) distribuidos en distintos sectores de la cuenca. Entre estas últimas merecen destacarse las obtenidas recientemente en las áreas donde la unidad está siendo analizada como reservorio no convencional (por ej., Filo Morado y Corralera).

La integración y análisis de esta información permitió reconocer la distribución de facies y sistemas de acumulación, tanto lateralmente como verticalmente dentro del intervalo estudiado. Además, las tendencias principales de arreglos estratales internos y sus superficies estratigráficas limitantes permitieron reconocer tres secuencias principales de acumulación para la unidad (Schwarz *et al.* 2021). Esta arquitectura secuencial fue identificada en una primera instancia en sectores con alta densidad de información (Fig. 4) pero sobre todo con contraste litofacial suficiente para comprender las relaciones entre depósitos proximales y distales. Posteriormente esta arquitectura de secuencias fue extrapolada a otros sectores de la cuenca mediante construcción de transectas de correlación con distintas orientaciones (Fig. 1, detalle en Schwarz *et al.* 2022). En forma adicional, los trabajos recientes de integración de sísmica con pozos para el intervalo de estudio han permitido corroborar en gran medida la precisión de estas correlaciones (por ej., figura 7 en Echevarria *et al.* 2022). Por su parte, la correlación con los afloramientos permitió dar un marco temporal para las tres secuencias definidas, basado principalmente en la bioestratigrafía de amonites (Fig. 4). De este modo, las reconstrucciones paleogeográficas que se presentan en este trabajo para distintas etapas de las tres secuencias elementales están soportadas por un robusto armazón cronoestratigráfico, sismoestratigráfico y estratigráfico-secuencial.

ASOCIACIONES DE FACIES Y SISTEMAS DE ACUMULACIÓN

Schwarz *et al.* (2022) recientemente realizaron una propuesta de revisión e integración de las asociaciones de facies y sistemas de acumulación registrados en el intervalo de estudio, que sirve de base para este trabajo. Un grupo de siete sistemas de acumulación se registran de manera constante a lo largo de la evolución de la unidad y sus depósitos están presentes con variable abundancia, en las tres secuencias depositacionales identificadas. Estos siete sistemas de acumulación se denominan aquí: 1) sistema deltaico fluvio-dominado, 2) sistema deltaico con influencia hasta dominancia de procesos de olas, 3) sistema de *shoreface*, 4) sistema de *offshore* proximal a distal, 5) sistema de cuenca mixto (silicoclástico-carbonático), 6) sistema de cuenca carbonático, y 7) sistema fluvial. En forma adicional dos sistemas de acumulación se han identificado exclusivamente en la primera secuencia depositacional y se denominan sistema de campos mareales de *offshore* y cinturón limoso de *offshore*, respectivamente.

Una detallada descripción de las asociaciones de facies pertenecientes a cada sistema de acumulación escapa al objetivo de este trabajo, pero pueden ser consultadas en otras publicaciones recientes. La caracterización de detalle de las asociaciones pertenecientes a sistemas deltaicos de distinta naturaleza se encuentra disponible para los bloques El Mangrullo (Schwarz *et al.* 2018a), Volcán Auca Mahuida-Señal Cerro Bayo (Shchepetkina *et al.* 2020) y para el TPRC (Iñigo *et al.* 2019), así como localmente para algunos sectores de afloramiento (Schwarz *et al.* 2021). Las asociaciones de facies y modelos de acumulación de los sistemas de *shoreface* pueden consultarse en Schwarz *et*

al. (2018b) e Isla *et al.* (2018, 2020a,b,c). Por su parte, los tipos de depósitos y particularidades de los sistemas finos de *offshore*, cuenca mixto y cuenca carbonático están descriptos y analizados en Moore *et al.* (2020) y Remírez *et al.* (2020, 2022). Las asociaciones de facies interpretadas para los campos mareales de *offshore* pueden consultarse en Veiga y Schwarz (2017). Las características de los depósitos interpretados como sistema de cinturón limoso de *offshore* se encuentran en Remírez *et al.* (2022) y Schwarz *et al.* (2022). Finalmente, para los depósitos interpretados como netamente fluviales no se posee información de testigos de corona y su interpretación elemental deviene de los análisis de perfiles de pozos y descripciones litológicas (Schwarz *et al.* 2022).

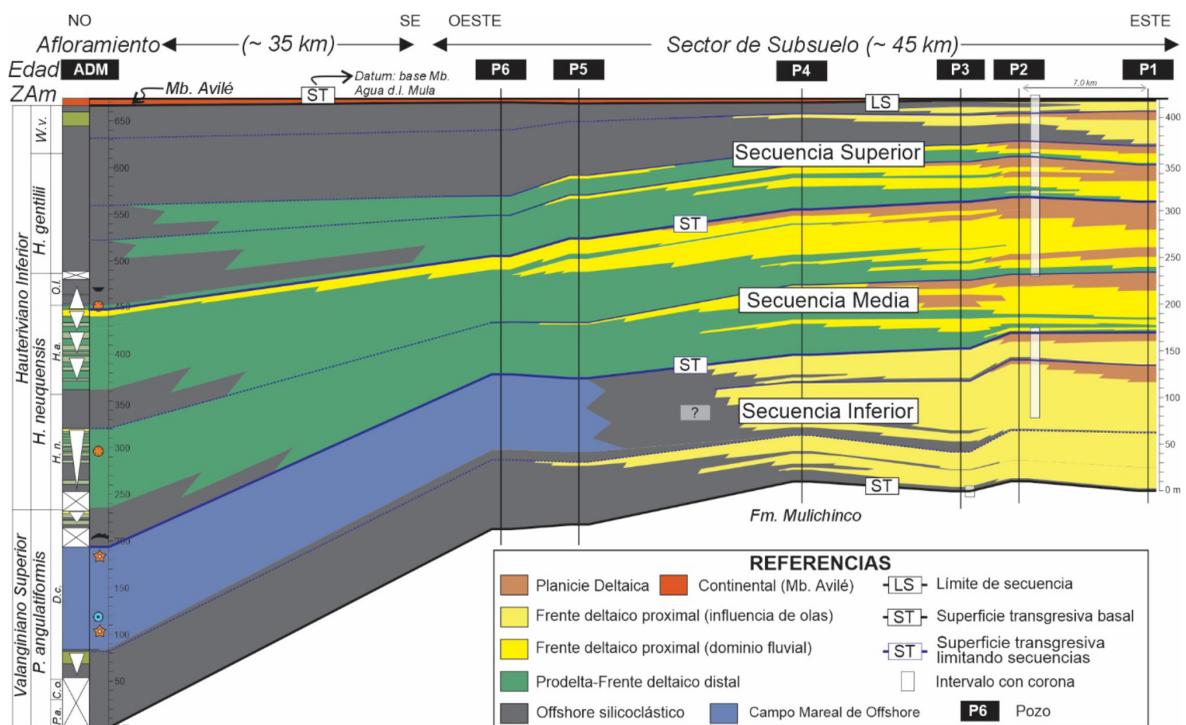


Figura 4. Transecta de correlación entre Rincón del Mangrullo por el este y la localidad Agrío del Medio (ADM) por el oeste, mostrando la distribución de asociaciones de facies, principales sistemas de acumulación interpretados y las tres secuencias principales identificadas dentro del intervalo de estudio (modificado de Schwarz *et al.* 2021). Se indica la ubicación aproximada de los testigos de corona disponibles para El Mangrullo. Zonas y subzonas bioestratigráficas según Aguirre-Urreta *et al.* (2019). Ubicación de transecta en figura 1.

SECUENCIAS Y RECONSTRUCCIONES PALEOGEOGRÁFICAS

Las tres secuencias depositacionales identificadas en este trabajo (Inferior, Media y Superior) fueron en primer lugar reconocidas en sectores intermedios de la cuenca y luego extrapoladas hacia sectores distales y proximales, donde la uniformidad facial generalmente hace más dificultosa la definición de secuencias (Figs. 4, 5). Las tres secuencias poseen además un rango temporal definido por la biozonación de amonites disponible para la unidad.

1. Secuencia Inferior

La transgresión generalizada sobre depósitos asignables a la Formación Mulichinco representa una migración de la línea de costa hacia el continente del orden de los 150 km (Fig. 6A) y el inicio de la sedimentación incluida en el intervalo de estudio. Si bien la fase transgresiva comenzó en tiempos de la unidad anterior (Schwarz *et al.* 2006; Schwarz *et al.* 2011, Fig. 2), la máxima transgresión probablemente tuvo lugar durante la zona amonítifera de *P. angulatiformis* (Fig. 5). Para este momento, los sedimentos asignables a ambientes marinos someros y marino-marginales probablemente estaban confinados a la región sureste de la cuenca actual y en gran parte del resto del Mar Neuquino se acumulaban sedimentos fangosos (Fig. 6A). En el sector norte la producción de fango carbonático pelágico sobrepasaba al aporte terrígeno produciendo un ambiente de cuenca carbonático cuyo fondo marino se encontraba en condiciones anóxicas a subóxicas (Remírez *et al.* 2020, 2022). Por su parte, y según lo indica el registro amonítifero, la zona oeste de la actual Dorsal de Huincul y la región llamada Subcuenca de Picún Leufú se habría mantenido como un alto topográfico que no fue inundado en esta fase transgresiva inicial (Fig. 5).

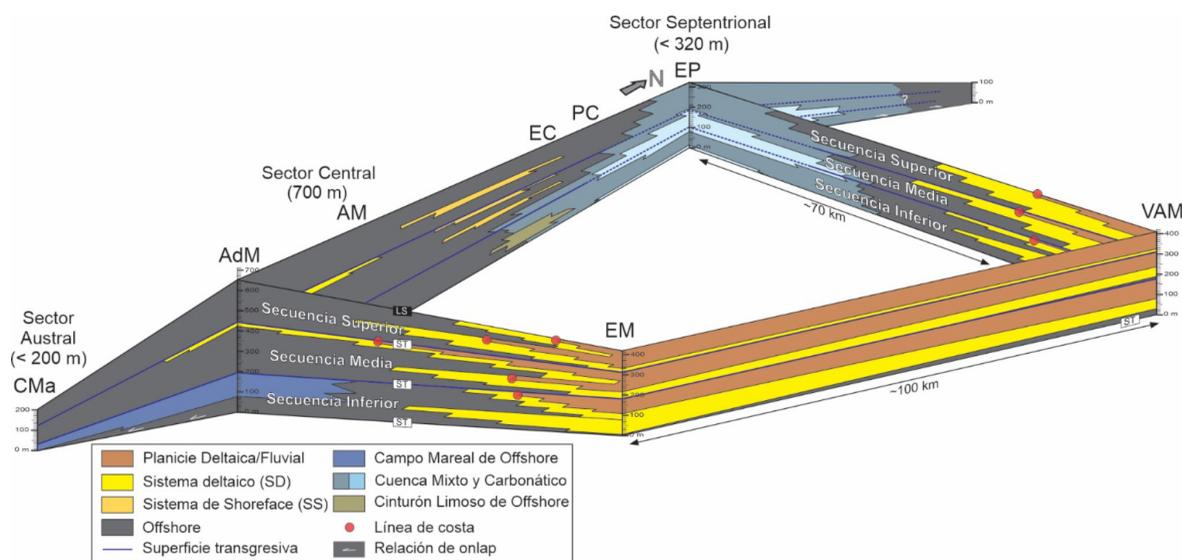


Figura 5. Diagrama tridimensional simplificado mostrando la distribución de sistemas deposicionales, secuencias y estratigrafía resultante para el área analizada. Notar la importante variación de espesor en los sectores dominados por sucesiones pelíticas. Nombres de localidades como en Figura 1.

Luego de la máxima transgresión de esta secuencia se registra una fase de progradación que abarca las subzonas de *C. ornatum* y parte inferior de *D. crassicostatus* (Fig. 4). Las fajas costeras con sus áreas subcúeas someras adyacentes (frentes deltaicos y sistemas de *shoreface* contemporáneos) definen para este periodo una morfología arqueada con su ápice apuntando al noroeste (Fig. 6B). Entre las zonas de frentes deltaicos, los procesos fluviales dominaban en el sector norte

(Shchepetkina *et al.* 2020), en tanto que en el sector sur se producían barras de desembocadura con importante mezcla de procesos fluviales y retrabajo de olas (Fig. 4).

En las zonas de *offshore* se registran distintas condiciones. Por un lado, se produce una sedimentación limosa preferencial en un sector de unos 60 km de extensión (Cinturón limoso de *Offshore*), que podría estar orientado de manera subparalela a las isóbatas (Fig 6B), ya que coincide con la identificación y orientación de clinofomas dentro de la unidad (Masarik *et al.* 2022). Esta concentración anómala de sedimentos limosos silicoclásticos desconectados de las zonas someras sugiere la presencia de corrientes de fondo semipermanentes capaces de transportarlos decenas de kilómetros dentro del ambiente de *offshore* (Remírez *et al.* 2022, Schwarz *et al.* 2022). La muy intensa bioturbación de estos depósitos limosos sugiere una colonización biogénica casi permanente en sustratos estables y bien oxigenados, probablemente favorecidos por las corrientes de fondo. Más hacia el interior del Mar Neuquino por el norte, se produce, en relación a la etapa inicial, una reducción de la zona de cuenca dominada por material carbonático a expensas de la expansión de la zona de cuenca con mezcla de material silicoclástico y carbonático que es coincidente con la progradación (Fig. 6B).

La última fase de sedimentación durante la Secuencia Inferior (que abarca gran parte de la subzona de D.c.) se distingue por un patrón levemente progradacional en el norte y agradacional en el sector central (Figs. 4, 5), así como el inicio del sistema de campos mareales de *offshore* generados por corrientes mareales rotativas en el sector central y austral (Fig. 6C). En estos campos se generaban dunas transversales de varios metros de altura que migraban preferencialmente al suroeste, y sedimentos más finos en los sectores corriente debajo y/o lateralmente (Veiga y Schwarz 2017). Las corrientes mareales rotativas probablemente capturaban sedimentos arenosos de zonas más someras y los mezclaban en regiones de *offshore* con ooides y fragmentos bioclásticos. Crinoideos viviendo preferentemente en los pies de las dunas (Lazo *et al.* 2020) proveían la mayor proporción de material bioclástico. Depósitos asociados a estos sistemas se distribuyen desde el sector central de afloramientos hasta el sector austral (Fig. 5). Estas evidencias sumado el registro amonitifero disponible, permite sostener que recién en esta última etapa de la Secuencia Inferior el Mar Neuquino habría inundado y posibilitado la sedimentación en la Subcuenca de Picún Leufú. Por su parte, en el sector norte comienza a ampliarse nuevamente la influencia de ambientes de cuenca carbonáticos para este momento (Fig. 6C), que coincide con el inicio de nuevas condiciones de sustratos empobrecidos en oxígeno (Remírez *et al.* 2020, 2022).

2. Secuencia Media

La base de la Secuencia Media se define no solo por un episodio de transgresión generalizada, sino también por una importante modificación en los patrones de sedimentación de las regiones de *offshore*. Según el registro biostratigráfico disponible esta superficie transgresiva se ubicaría

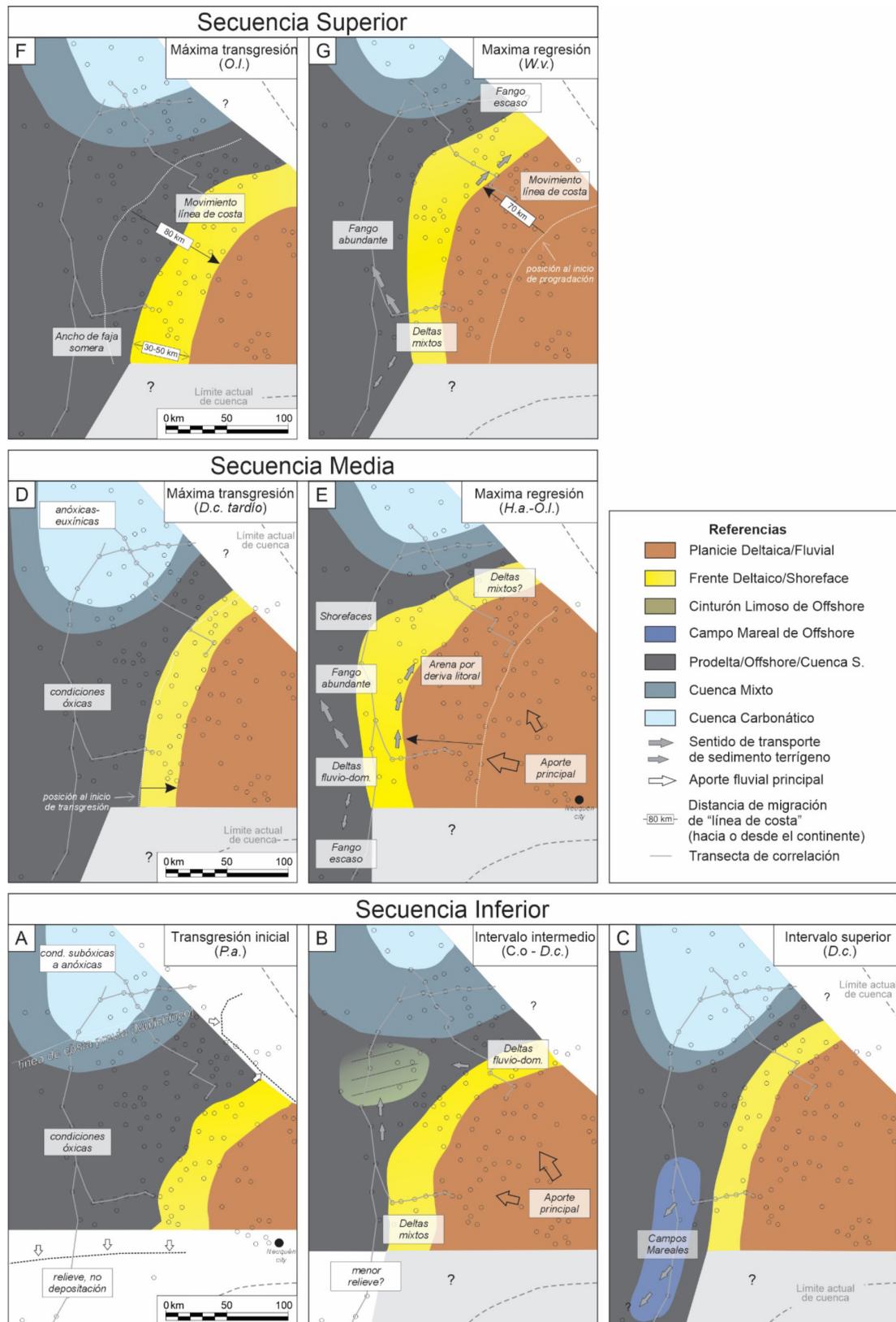


Figura 6. Evolución paleogeográfica del intervalo de estudio visualizado en siete etapas diferentes desde más antiguo (abajo) a más joven (arriba). A-C) Secuencia Inferior, D) y E) Secuencia Media, F) y G) Secuencia Superior.

temporalmente hacia el final de la subzona de *D. crassicostatus* (Fig. 4). En las zonas intermedias de la región considerada esta superficie se identifica debido a una migración de la línea de costa hacia el continente del orden de los 30 a 40 km, en tanto hacia el oeste y suroeste se registra la desactivación de los campos mareales de *offshore* (Figs. 5, 6D). Por su parte, para este momento en el sector norte se alcanza la máxima expansión del sistema de cuenca carbonática, el cual se caracteriza además por portar los registros geoquímicos que indican la mayor deficiencia de oxígeno en el sustrato (Remírez *et al.* 2020, 2022). No sorprende que estas condiciones definidas como anóxicas hasta euxínicas coincidan además con los mayores valores de carbono orgánico total medidos para toda la unidad. Los valores de COT de afloramiento para este intervalo promedian 4%, con picos de hasta 17% (SI2 de Moore *et al.* 2020), en tanto los valores medidos en pozos exploratorios no convencionales indican valores comunes de 2 a 3% para este intervalo (Seoane e Iovine 2021).

Luego de alcanzada la máxima transgresión comienza una fase de progradación de largo término que significa una migración costa afuera de la línea de costa de unos 60-70 km (Figs. 5, 6E). Hacia el final de esa progradación, amplios sectores que en su inicio correspondían a ambientes de *offshore* son reemplazados por la instalación de sistemas de planicies deltaicas a fluviales. Frentes deltaicos fluvio-dominados son recurrentes en algunos sectores de subsuelo e inclusive poseen expresión en los afloramientos adyacentes (Fig. 4), en tanto hacia el norte se registra un predominio de sistemas de *shoreface* (Figs. 5, 6E). Estudios recientes de proveniencia (Schwarz *et al.* 2021) confirman hipótesis previas acerca de que gran parte de la arena disponible en dichos ambientes se habría transportado por corrientes longitudinales desde deltas ubicados más al sur (Schwarz *et al.* 2018b). En cualquier caso, la morfología general de la franja de ambientes costeros y someros continúa mostrando en esta etapa una forma arqueada con su ápex apuntando hacia el noroeste (Fig. 6E).

En lo que respecta a los ambientes marinos distales, por un lado, se registra una disminución de las fajas de cuenca mixta y carbonática, que quedan confinadas al sector más septentrional del área de estudio (Fig. 6E). Por otra parte, la comparación de espesores resultantes a lo largo de las regiones marinas distales permite deducir diferentes patrones de distribución de sedimentos finos. El volumen más importante se concentraba en el sector ubicado al oeste, donde la Secuencia Media alcanza valores máximos de 250 m de sedimentos casi exclusivamente silicoclásticos (Figs. 4, 5). En el sector austral ese espesor se reduce a unos 100 m de fangos silicoclásticos en tanto en el sector norte posee similar potencia, pero con baja participación de terrígenos. De esto puede deducirse una relativa baja distribución de fangos desde los deltas de la región de El Mangrullo hacia el suroeste, así como una relativamente baja tasa de exportación de finos desde los sistemas deltaicos ubicados en el norte para el mismo período (Fig. 6E). Esta distribución de fangos en los sistemas distales se mantiene e inclusive se acentúa en la etapa correspondiente a la última secuencia.

3. Secuencia Superior

El evento transgresivo que marca la base de la Secuencia Superior representa una migración continente adentro de unos 80 km, de modo tal que ambientes previos de planicies deltaicas y sistemas fluviales distales son inundados y transformados en sectores de prodelta, e incluso *offshore* (Fig. 6F). La superficie transgresiva puede ubicarse al final de la subzona de H. agrioensis en amplias regiones del área considerada (Fig. 4), aunque en algunos sectores del norte puede ser datada como perteneciente al inicio de la subzona de O. laticosta (Schwarz *et al.* 2022). Por su parte, la máxima transgresión puede ubicarse claramente dentro de esta última subzona, y coincide en varios sectores de afloramiento con niveles fosilíferos que portan acumulaciones excepcionales de ostras (Toscano *et al.* 2018; Schwarz *et al.* 2018b). En los sectores del norte durante este momento se registra un leve incremento del ancho de la faja del sistema de cuenca mixto, pero no así una expansión del sector de cuenca carbonático (Fig. 6F). Tampoco existen indicadores geoquímicos inorgánicos u orgánicos que apunten hacia deficiencias importantes en los tenores de oxígeno ni preservación de materia orgánica (Moore *et al.* 2020; Remírez *et al.* 2022). Esto sugiere un comportamiento diferente para esta etapa (en relación a la Secuencia Media) entre transgresión de la línea de costa y producción de carbonato pelágico.

La configuración paleogeográfica durante la fase de progradación que se desarrolla posteriormente es muy similar a la inferida para la Secuencia Media. Hacia el final de esta fase regresiva, la línea de costa migró unos 70 km en sentido general noroeste y las zonas costeras y someras retienen la morfología arqueada que dominó durante toda la evolución (Fig. 6G). En sentido vertical, por otro lado, en estas zonas someras se aprecia una variación de los sistemas deltaicos, desde fluvio-dominados en el inicio de la etapa, a deltas con fuerte influencia de olas en los estadios póstumos (Fig. 4). En el sector de El Mangrullo además se infiere para el estadio final un cambio hacia patrones de agradación hasta retrogradación, pero que a lo largo del rumbo depositacional se van perdiendo (Fig. 5, entre EM y VAM). Esto podría sugerir una importante variación en las condiciones de aporte en relación a la acomodación a lo largo del rumbo depositacional.

DISCUSIÓN E IMPLICANCIAS

La paleogeografía del intervalo Pilmatué-Agrio Inferior-Centenario Inferior ha sido comúnmente visualizada como conformada por depósitos continentales no solo en el sector oriental, sino también en el sector austral y nororiental de la configuración actual de la cuenca (Legarreta y Gulisano 1989; Legarreta y Uliana 1991, 1999; Cabaleiro *et al.* 2002). Sin embargo, las reconstrucciones generadas en este trabajo muestran un diseño muy diferente para todo el intervalo de estudio, con una morfología general arqueada de las zonas conformadas por las

fajas de facies costeras a someras y con ambientes distales (*offshore* y cuenca) que se desarrollan rodeando esta faja por el suroeste, oeste, noroeste y noreste (Fig. 6).

Es de notar que los ambientes de cuenca mixto y carbonático sólo se registran en el sector norte, como expresiones más distales del ambiente de *offshore* silicoclástico (Remírez *et al.* 2022). En cambio, hacia el oeste y suroeste sólo se registran sistemas puramente silicoclásticos, aunque con una variación muy significativa de las tasas de sedimentación (Fig. 5).

En relación a propuestas anteriores, las reconstrucciones paleogeográficas presentadas en este trabajo sugieren que algunas interpretaciones previas basadas en una menor cantidad de información tienen que ser seriamente cuestionadas. En primer lugar, la propuesta de que los sistemas deltaicos del área Volcán Auca Mahuida progradaran principalmente hacia el suroeste (Shchepetkina *et al.* 2020), no parece factible en este contexto. El avance de los tractos de sistemas hacia el interior del Mar Neuquino se producía en sentido predominante al noroeste para esta región según lo indica la distribución lateral de ambientes (Figs. 5 y 6). Análisis sísmicos regionales también muestran el desarrollo de clinofórmulas de gran escala orientadas SO-NE con inclinaciones predominantes hacia el noroeste en el norte del Neuquén, confirmando tendencias de progradación generales en ese sentido (Masarik *et al.* 2022).

En segundo lugar, la propuesta original de que en la zona de afloramientos se definía un tren proximal-distal de sur a norte era una opción posible en la etapa inicial de conocimiento de la cuenca (Legarreta y Gulisano, 1989), que algunos autores aún sostienen (Pazos *et al.* 2020). No obstante, eso es claramente refutable por el amplio dominio de facies de *offshore* en toda la región de afloramientos, e inclusive porque en algunos sectores de la región norte hay una mayor presencia de facies arenosas de *shoreface* (Figs. 5, 6). En cambio, lo que sí se registra en sentido norte-sur del sector andino es una variación muy importante en la distribución de los fangos que alcanzan ambientes de *offshore*. Durante toda la evolución, el volumen más importante de fango estuvo confinado en el sector central de afloramientos, con tasas de sedimentación que duplicaban las de la región austral y más que triplicaban las estimadas para el sector más septentrional. En esta región no solo el registro es relativamente delgado (unos 350 m, Fig. 5), sino que alrededor del 50% del material fino es fango carbonático pelágico (Schwarz *et al.* 2022).

En tercer lugar, la evolución paleoambiental, secuencial y paleogeográfica resumida en este trabajo posee fuertes implicancias para la construcción de modelos exploratorios para reservorios no convencionales dentro del Miembro Agrio Inferior. Clásicamente se ha considerado al intervalo transgresivo basal de esta unidad como aquel con mejor perspectiva de constituir roca madre (Tyson *et al.* 2005; Pazos *et al.*, 2020) y por lo tanto de ser considerado un objetivo principal como reservorio no convencional shale. No obstante, de este trabajo se desprende que es el intervalo relacionado con la base de la Secuencia Media el que presenta las mejores características como facies organógenas, que coincide con los depósitos finos más enriquecidos en fango carbonático y se ubica unos 100 m por arriba de la base de la unidad en el norte de Neuquén (Fig. 5). En

este sentido también es importante resaltar que el modelo prospectivo del Mb. Agrio Inferior podría ser sustancialmente diferente al visualizado para el shale de la Fm. Vaca Muerta (por ej. Domínguez y Di Benedetto 2018) ya que las características paleoambientales y secuencias de Agrio Inferior poseen enormes diferencias con las interpretadas para el sistema Vaca Muerta-Quintuco-Loma Montosa. De manera general, es notable en el Miembro Agrio Inferior la posibilidad de comprender y reconocer los sistemas marinos someros silicoclásticos adyacentes a los ambientes distales, lo que permite mensurar por ejemplo las migraciones de la línea de costa a lo largo de las secuencias transgresivas-regresivas, así como comprender las principales rutas de distribución de fangos clásticos al medio marino (Figs. 5 y 6). Todos estos elementos predictivos deberían ser incorporados para la construcción de modelos geológicos robustos de reservorios no convencionales *shale* en el Miembro Agrio Inferior.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (subsidio PIP#1122015-0100809) y a la Universidad Nacional de La Plata Código (subsidio I+D N832) por el financiamiento parcial de este proyecto. Se agradece también a Pampa Energía S.A., Petróleos Sudamericanos S.A. e YPF S.A. por convenios de colaboración científica en ejecución o concluidos que colaboraron en el desarrollo de esta investigación. Se agradece también las revisiones de F. Domínguez, C. Arregui y M. Asensio que mejoraron la presentación de este trabajo.

REFERENCIAS CITADAS

- Aguirre-Urreta B., Martínez, M., Schmitz, M., Lescano, M., Omarini, J., Tunik, M., Kuhnert, H., Concheyro, A., Rawson, P.F., Ramos, V.A., Reboulet, S., Noclinh, N., Frederichs, T., Nickl, A., Pälke, H., 2019. Interhemispheric radio-astrochronological calibration of the time scales from the Andean and the Tethyan areas in the Valanginian-Hauterivian (Early Cretaceous), Gondwana Research, N° 70, p. 104-132.
- Cabaleiro, A., Cazau, L., Lasalle, D., Penna, E., Robles, D., 2002. Los reservorios de la Formación Centenario. En Simposio de Rocas reservorio de las cuencas productivas de la Argentina. V Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, p. 407-426. Mar del Plata, Argentina.
- Delpino, D., Santiago, E., Carrizo, N., Méndez, M., Zurita, D., 2014. Miembro Centenario Inferior: un nuevo reservorio en el yacimiento Volcán Auca Mahuida-Risco Alto-Las Manadas. Cuenca Neuquina. En: Argentina. Abstractos Extendidos, IX Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos. IAPG, Mendoza, Argentina, pp. 65-72.
- Digregorio, J. H, 1972, Neuquén. Geología Regional Argentina. Academia Nacional de Ciencias, Córdoba, p. 139-505.
- Digregorio J.H. y M.A. Uliana, 1980. Cuenca Neuquina. En: J.C.M. Turner (ed.), Geología Regional

- Argentina. Academia Nacional de Ciencias, 2: 985-1032. Córdoba.
- Domínguez, R.F. and Di Benedetto, M., 2018, Casos de variabilidad lateral en el sistema Vaca Muerta-Quintuco y su impacto en la distribución de facies ricas en materia orgánica. En: Santiago, M., Fantín, M., Vallejo, M.D., González Tomassini, F., Estrada, S., Marchal, D., Aguirre, H., López, S. (eds.), Simposio de Recursos No Convencionales: Hacia una Nueva Convención, 10º Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Mendoza, Argentina: Instituto Argentino del Petróleo, p. 91-104
- Echevarria, C. y Schwarz, E., 2021, Los reservorios del Miembro Pilmatué de la Formación Agrio en el Yacimiento El Mangrullo, Cuenca Neuquina. VIII Latin American Congress of Sedimentology y XVII Reunión Argentina de Sedimentología, p. 63. Paraná, Argentina.
- Echevarria, C., Schwarz, E., Suárez, M., Montenegro, S., Ferreyro R., Giménez, B., Montagna, A., Martín, F., 2022. Caracterización sismo-estratigráfica y sedimentológica del intervalo Agrio-Centenario en el sector central de la Cuenca Neuquina. Este congreso.
- Iñigo, J.F.P., Pazos, P.J., Novara, M.E. y Comerio, M., 2019. The Lower Cretaceous Centenario Formation: A subsurface unit in the northeastern border of the Neuquén Basin revisited, *Journal of South American Earth Sciences*, N° 92, 598-608.
- Howell, J.A., E. Schwarz, L.A. Spalletti y G.D. Veiga, 2005. The Neuquén Basin: an Overview. en G. Veiga, L., Spalletti, J.A., Howell y E. Schwarz (eds.), *The Neuquén Basin, Argentina: a case study in Sequence Stratigraphy and Basin Dynamics*, Geological Society of London, Special Publications 252, p. 1-14.
- Isla, M.F., Schwarz, E. y Veiga, G.D., 2018. Bedset characterization within a wave-dominated shallow-marine succession: an evolutionary model related to sediment imbalances, *Sedimentary Geology*, N° 374, p. 36-52.
- Isla, M.F., Coronel, M.D., Schwarz, E., y Veiga, G.D., 2020a. Depositional architecture of a wave-dominated clastic shoreline (Pilmatué Member, Argentina): Improving knowledge about the stratigraphic record of bar-trough systems, *Marine and Petroleum Geology*, N° 118, 104417.
- Isla, M.F., Ramirez, M.N., Schwarz, E., y Veiga, G.D., 2020b. Vertical changes in shoreline morphology at intra-parasequence scale, *Latin American Journal of Sedimentary and Basin Analysis*, N° 27, p. 85-106.
- Isla, M.F., Schwarz, E., y Veiga, G.D., 2020c. Record of a nonbarred clastic shoreline. *Geology*, N° 48, p. 338-342.
- Lazo, D.G., Bressan, G.S., Schwarz, E., Veiga, G.D., 2020. First articulated stalked crinoids from the Mesozoic of South America: two new species from the Lower Cretaceous of the Neuquén Basin, west-central Argentina. *Journal of Paleontology*, N° 94(4), p. 716-733.
- Leanza, H.A., Hugo, C., 2001. Hoja Geológica Zapala, Hoja 3969-I, 1:250.000. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Boletín 275, p. 1-128.
- Legarreta, L. and Gulisano, C.A., 1989. Análisis estratigráfico secuencial de la Cuenca Neuquina (Triásico Superior-Terciario inferior). En: G. Chebli and L.A. Spalletti (eds), *Cuencas Sedimentarias Argentinas. Serie Correlación Geológica*, N° 6, pp. 221-243.
- Legarreta, L., Uliana, M.A., 1991. Jurassic-Cretaceous marine oscillations and geometry of a back-arc basin fill, central Argentine Andes. En: MacDon-

- ald, D.I.M. (ed.), *Sedimentation, tectonics and eustasy: Sea level changes at active margins*. IAS Special Publication 12, pp. 429-450.
- Masarik, C., Sales, T., Schwarz, E., Echevarria, C., Lazari, V., C. Segí, y otros, 2022. Reservorios convencionales a reservorios shale: Caracterización sismo-estratigráfica y sedimentológica del intervalo Agrio-Centenario en el sector norte de la Cuenca Neuquina. Este congreso.
- Moore, S.A., Birgenheier, L.P., Greb, M.D., Minisini, D., Tunik, M. y Omarini, J., 2020. Facies heterogeneity and source potential of carbonate-mudstone-dominated distal ramp deposits, Agrio Formation, Neuquén Basin, Argentina, *Journal of Sedimentary Research*, N° 90, p. 533-570.
- Pazos, P.J., Comerio, M., Fernández, D.E., Gutiérrez, C., González Estebenet, M.C., Heredia, A.M., 2020. Sedimentology and sequence stratigraphy of the Agrio Formation (late Valanginian–earliest Barremian) and the closure of the Mendoza Group to the north of the Huincul high. En: Kietzmann D., Folguera A. (eds.), *Opening and Closure of the Neuquén Basin in the Southern Andes*. Springer Earth System Sciences, pp. 237–265.
- Remírez, M.N., Spalletti, L.A., e Isla, M.F., 2020. Petrographic, mineralogical and geochemical characterization of fine-grained rocks of the Pilmatué Member (Upper Valanginian-lower Hauterivian) of the Neuquén Basin (Argentina): Implications for siliciclastic input, carbonate productivity and redox conditions, *Journal of South American Earth Sciences* 102, #102663.
- Remírez, M., Spalletti, L.A., Isla, M.F., y Schwarz, E., 2022. Fine-grained distal deposits of a mixed siliciclastic-carbonate marine system: origin of mud and implications on mixing processes, *Journal of Sedimentary Research*, N° 92, p. 210-231.
- Schwarz, E., Spalletti, L.A. y Howell, J.A. 2006. Sedimentary response to a tectonically induced sea-level fall in a shallow back-arc basin: the Mulichinco Formation (Lower Cretaceous), Neuquén Basin, Argentina, *Sedimentology*, N° 53, p 55-81.
- Schwarz, E., L.A. Spalletti y G.D. Veiga, 2011, La Formación Mulichinco (Valanginiano). En: H. Leanza, J. Vallés, C. Arregui, y J.C. Danieli (eds.), *Relatorio del XVIII Congreso Geológico Argentino: Geología y Recursos Naturales de la provincia del Neuquén*, pp. 131-144.
- Schwarz, E., Echevarria, C., and Veiga, G.D., 2018a. Sedimentología y estratigrafía secuencial de alta resolución de reservorios no convencionales de origen deltaico del Miembro Pilmatué (Formación Agrio, Cuenca Neuquina). En: Santiago, M., Fantín, M., Vallejo, M.D., González Tomasini, F., Estrada, S., Marchal, D., Aguirre, H., and López, S. (eds.), *Simposio Reservorios No Convencionales. 10° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Mendoza, Argentina: Instituto Argentino del Petróleo*, pp. 363-385.
- Schwarz, E., G.D. Veiga, G. Álvarez Trentini, M.F. Isla, y L.A. Spalletti, L.A., 2018b. Expanding the spectrum of shallow-marine, mixed carbonate-siliciclastic systems: processes, facies distribution, and depositional controls of a siliciclastic-dominated example., *Sedimentology*, N° 65, p. 1558-1589.
- Schwarz, E., Finzel, E.S., Veiga, G.D., Rapela, C.W., Echevarria, C. y Spalletti, L.A., 2021. U-Pb geochronology and paleogeography of the Valanginian–Hauterivian Neuquén Basin: Implications for Gondwana-scale source areas, *Geosphere*, N° 17, p.

- 244-270.
- Schwarz, E, M. Remírez, D.G. Lazo, G.D. Veiga, M.I. Isla, C. Echevarria, A.G. Toscano, R.M. Garberoglio, 2022. A review on depositional systems, bioevents and paleogeography of the Valanginian-Hauterivian Neuquén Sea: Refining sedimentary and biological signals linked to the dynamics of epeiric seas. *Earth-Science Reviews* (en revisión).
- Seoane, N. y Iovine, G., 2021. Análisis de la sección inferior de la Formación Agrio como reservorio shale. Ciclo de conferencias "Reservorios Shale de Argentina", organizado por el IAPG. 21 de octubre de 2022.
- Shchepetkina, A., Ponce, J.J., Carmona, N.B., Mángano, M.G., Buatois, L.A., Ribas, S., Benvenuto, M.C.V., 2020. Sedimentological and ichnological analyses of the continental to marginal-marine Centenario Formation (Cretaceous), Neuquén Basin, Argentina: Reservoir implications. *Marine and Petroleum Geology*, N° 119, #104471.
- Spalletti, L.A., G.D. Veiga y E. Schwarz, 2011. La Formación Agrio (Cretácico Temprano). En: H. Leanza, J. Vallés, C. Arregui, y J.C. Danielli (eds.), *Relatorio del XVIII Congreso Geológico Argentino: Geología y Recursos Naturales de la provincia del Neuquén*, pp. 145-160.
- Toscano, A.G., Lazo, D.G., Luci, L., 2018. Taphonomy and paleoecology of lower cretaceous oyster mass occurrences from west-central Argentina and evolutionary paleoecology of gregariousness in oysters, *Palaios*, N°33, p. 237-255.
- Tyson, R.V., Esherwood, P., Pattison, K.A., 2005. Organic facies variations in the Valanginian-mid-Hauterivian interval of the Agrio Formation (Chos Malal area, Neuquén, Argentina): local significance and global context. En: Veiga, G.D., Spalletti, L.A., Howell, J.A., and Schwarz, E. (eds.), *The Neuquén Basin: A Case Study in Sequence Stratigraphy and Basin Dynamics*. Geological Society, London, Special Publication, pp. 251-266.
- Uliana, M.A., Dellapé, D.A. y Pando, G.A., 1977. Análisis estratigráfico y evaluación del potencial petrolífero de las formaciones Mulichinco, Chachao y Agrio (Cretácico Inferior de las Provincias de Neuquén y Mendoza), *Petrotecnia*, N° 31, p. 31-46.
- Veiga, G.D. y E. Schwarz, 2017. Facies characterization and sequential evolution of an ancient *off-shore* dunefield in a semi-enclosed sea: Neuquén Basin, Argentina. *Geo-Marine Letters* 37, p. 411-426.
- Veiga, G.D., and Vergani, G.D., 2011. El Miembro Troncoso Inferior de la Formación Huitrín (Cretácico Temprano). En: Leanza, H.A., Arregui, C., Carbone, O., Danielli, J.C., and Vallés, J.M., (eds.), *Relatorio del XVIII Congreso Geológico Argentino: Geología y Recursos Naturales de la provincia del Neuquén*, pp. 181-188.
- Veiga, G.D., Spalletti, L.A. y Flint, S.S. 2007. Anatomy of a fluvial lowstand wedge: the Avilé Member of the Agrio Formation (Hauterivian) in central Neuquén Basin (NW Neuquén province), Argentina. En: Nichols, G., Williams, E. & Paola, C. (eds.): *Sedimentary Environments, Processes and Basins. A tribute to Peter Friend*. Special Publication International Association of Sedimentologists, 38, pp. 341-365.
- Veiga, G.D., Spalletti, L.A. and Schwarz, E., 2011. El Miembro Avilé de la Formación Agrio (Cretácico Temprano). En: Leanza, H.A., Arregui, C., Carbone, O., Danielli, J.C., and Vallés, J.M. (eds)

Geología y Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén. 18° Congreso Geológico Argentino, pp. 161-173.

Vergani, G., Barrionuevo, M., Sosa, H. y Pedrazzini, M. 2001. Análisis estratigráfico secuencial de alta resolución en las formaciones Agrio y Huit-

rín del Yacimiento Puesto Hernández, Cuenca Neuquina, Argentina, Boletín de Informaciones Petroleras 3°, N° 67, p. 76-87.

Weaver, V., 1931. Palaeontology of the Jurassic and Cretaceous central Argentina. University of Washington, Memoir, Seattle, 496 p.

