

VALLES INCISOS Y CAÑONES SUBMARINOS EN LA FORMACIÓN LAJAS. AVANCES EN EL CONOCIMIENTO DEL PLAY EXPLORATORIO

Facundo José Pagán¹, Karina Mykietiuik¹, Fernández Bell Fano¹, Rodolfo Guerello¹

1: Gerencia de Exploración, YPF S.A., facundo.j.pagan@ypf.com, karina.mykietiuik@ypf.com,
francisco.fernandezbellfano@ypf.com, rodolfo.guerello@ypf.com

Keywords: valles incisos, cañones submarinos, trampas estratigráficas, Lajas

ABSTRACT

Incised valley and submarine canyons in Lajas Formation. Advances in the knowledge of exploratory play.

The Cuyo Group reservoirs have been extensively studied in subsurface and outcrops, and their commercial exploitation has proven in traps with a conspicuous structural component. In low deformed areas and / or paleo-structures, stratigraphic traps type become relevant. In order to define new potential exploratory plays, interpretation was focused on the Middle Jurassic slope area of the Neuquén basin, and in particular on the incised valleys and submarine canyons, identified in 3D seismic, in order to characterize them as stratigraphic traps. These morphological features were recognized along a strip of more than 100 km long and 30 km wide in the central-western area of the basin in the middle and upper sections of the Lajas Formation.

The depositional model, highly progradational for the Cuyo Group in the central area of the Neuquén Basin, is interrupted by cycles of relative sea level fall and rise generating the alternation of negative and positive accommodation spaces, that result in the platform exposure, erosion and flooding with basinward displacement of non-marine depositional environments.

The high rates of sedimentary supply could have generated unstable slopes, favorable for the generation and evolution of submarine canyons. These, in turn, during their development towards the platform break could have captured the incised valleys developed on the platform even with small relative sea level variations.

Some of these interpreted eroded features and their sedimentary fill reach up to 10 km in length, 5 km in width and 200 m in thickness, being the average of about 7 km - 2.5 km - 150 m, respectively. In areas with high concentration of incisions, the stacking of different canyons and incised valleys can reach an area of about 400 km² and a thickness of 600 m. The purely stratigraphic character of this type of entrapment (cut and fill) makes it dependent on petrophysics and lateral and vertical variation. Seal efficiency is the critical factor of this play.

INTRODUCCIÓN

El Grupo Cuyo está integrado por un conjunto de rocas clásticas depositadas en ambientes marinos distales (Fm Los Molles), litorales (Fm Lajas), no marinos (Fms Challacó y Punta Rosada) y evaporíticos (Fm Tábanos) (Arregui *et al* 2011, Gulisano *et al* 1984, Groeber 1929, 1947). Es de

particular importancia ya que con éste se inicia la historia de relleno de la cuenca como receptora de sedimentos marinos (Arregui *et al* 2011, Leanza y Hugo 1995, Legarreta y Gulisano 1989).

La presencia de incisiones en el margen de una plataforma clástica suelen asociarse a cañones submarinos y/o valles incisos, con diferente desarrollo vertical y escala horizontal. A su vez, estos rasgos forman parte de los elementos que la estratigrafía secuencial identifica durante los períodos de nivel de mar bajo. Este descenso relativo y nivel bajo del mar implican pérdida de espacio de acomodación y aumento del aporte sedimentario debido al rejuvenecimiento de los sistemas fluviales que exportan material hacia la plataforma externa y el talud. De esta manera se favorece la generación de un amplio espectro de reservorios, entre los que se destacan los abanicos submarinos y los rellenos de valles incisos. Estos depósitos constituyen objetivos exploratorios en los márgenes de una plataforma.

La zona de estudio se encuentra dentro de una amplia región (Fig. 1 A y B) abordada numerosas veces con distintos enfoques y alcances desde el ámbito de la industria, como estructurales (Silvestro y Zubiri 2008), caracterización de reservorios (Raggio *et al* 2014, Brinkworth *et al* 2017) y geocronológicos (Naipauer *et al* 2017).

El objetivo de este trabajo es aportar al conocimiento del Grupo Cuyo fuera de las áreas más exploradas, donde predominan importantes trampas estructurales y los reservorios más investigados (baja porosidad y baja permeabilidad) son aquellos asociados a sistemas fluviales y a progradaciones deltaicas. La chance de ocurrencia de potenciales facies reservorios en ambientes sedimentarios asociados a cortejos de mar bajo en la ventana de gas (Fm Los Molles como roca generadora), amplía las posibilidades de existencia de acumulaciones de hidrocarburos en trampas estratigráficas en reservorios tipo tight gas.

Marco regional del estudio

El Grupo Cuyo, comprende el primer ciclo sedimentario marino que se desarrolló en la cuenca Neuquina (Fig. 1A) en un lapso de tiempo que abarca desde el Sinemuriano-Hettangiano en el sur de la provincia de Mendoza y del Pliensbachiano-Toarciano en la provincia del Neuquén, hasta el Calloviano Medio. Abarca un lapso de tiempo de 30 Ma aproximadamente (Figura 1C) según dataciones realizadas en circones de toba (Schiuma y Llambias 2008, Leanza *et al* 2013, Kamo y Ricardi 2009) y circones detríticos (Naipauer *et al* 2017).

Representa un ciclo completo transgresivo-regresivo (segundo orden) que incluye oscilaciones menores del nivel del mar que implicaron avances y retrocesos de la línea de costa. La generación de importantes espacios de acomodación resultó en una importante progradación que se inicia en el Aaleniano-Bajociano en la región sur y sudeste de la cuenca mientras que en el sur de la Provincia de Mendoza, continúa el esquema transgresivo por lo menos hasta el Bathoniano. El megaciclo culmina con un evento evaporítico desarrollado en el sector interno de la cuenca que

marca la máxima retracción y restricción marina previa a la discordancia Intracalloviana (Arregui *et al* 2011, Leanza y Hugo 1995, Legarreta y Gulisano 1989, Gulisano *et al* 1984, Groeber 1929, 1947). El aporte de sedimentos es principalmente desde el sur-sureste y en menor proporción desde el este. En el mapa de la Fig. 1B se muestra la distribución de espesores totales de las unidades que conforman el Grupo Cuyo, alcanzando su mayor potencia en la zona centro-sur de la cuenca.

El área de estudio se encuentra en la zona central de la cuenca Neuquina (Figura 1B), al noroeste del Lago Los Barreales y abarca un período de tiempo que se extiende desde el Toarciano tardío al Bajociano/Bathoniano, 6 Ma aproximadamente (Fig 1C).

Datos y metodología.

La zona de estudio cuenta con una muy buena cobertura de sísmica 3D, pero las registraciones datan en su mayoría de mediados de la década de 1990, cuyos objetivos fueron iluminar secciones más someras que incluyen reservorios de tipo convencional. Durante los años 2016 y 2017 se realizó una importante campaña de registración y procesamiento de sísmica 3D (~1800 km²) en la zona central de la cuenca Neuquina con objetivo principal en la Fm Vaca Muerta. Si bien

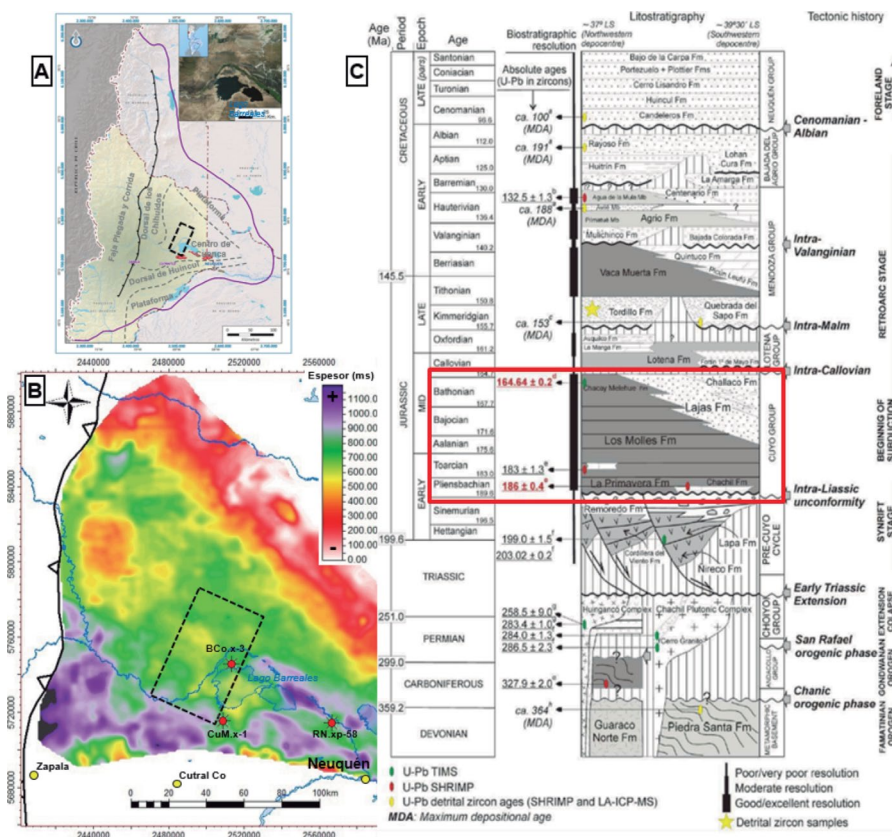


Figura 1. A) Ubicación de la zona de estudio en la cuenca neuquina, zona centro de cuenca. B) Mapa isocronopauico de Gr Cuyo con ubicación del área de estudio. C) Columna estratigráfica (modificada de Naipauer *et al* 2017); en recuadro rojo el Grupo Cuyo.

en algunos surveys anteriores fue posible identificar rasgos estratigráficos (geoformas), el nuevo conjunto registración-procesamiento permitió un reconocimiento más confiable de incisiones y su patrón de apilamiento interno (Fig. 2).

Las dos razones fundamentales de esta mejor imagen sísmica en unidades profundas son el diseño de la adquisición y el procesamiento del dato. En cuanto al diseño, fue orientado a generar una imagen sísmica de mayor calidad para formaciones más profundas (Vaca Muerta, Lajas y Los Molles) que en adquisiciones anteriores. Esto se logró a partir de la utilización de un offset máximo más largo, mayor cantidad de receptores (canales) y un patrón de azimuts completo (patch full azimuth). Para el procesamiento sísmico se utilizaron las técnicas más modernas de preservación de amplitudes relativas para la atenuación de ruido, sumado al uso de la interpolación 5D que permitió uniformizar los datos en una grilla más chica, 15m x 15m. En cuanto a la migración pre-stack en tiempo se utilizaron los algoritmos para datos anisotrópicos que utilizan las variaciones azimutales adquiridas. Con este procesamiento se obtuvo una mayor resolución tanto espacial como temporal.

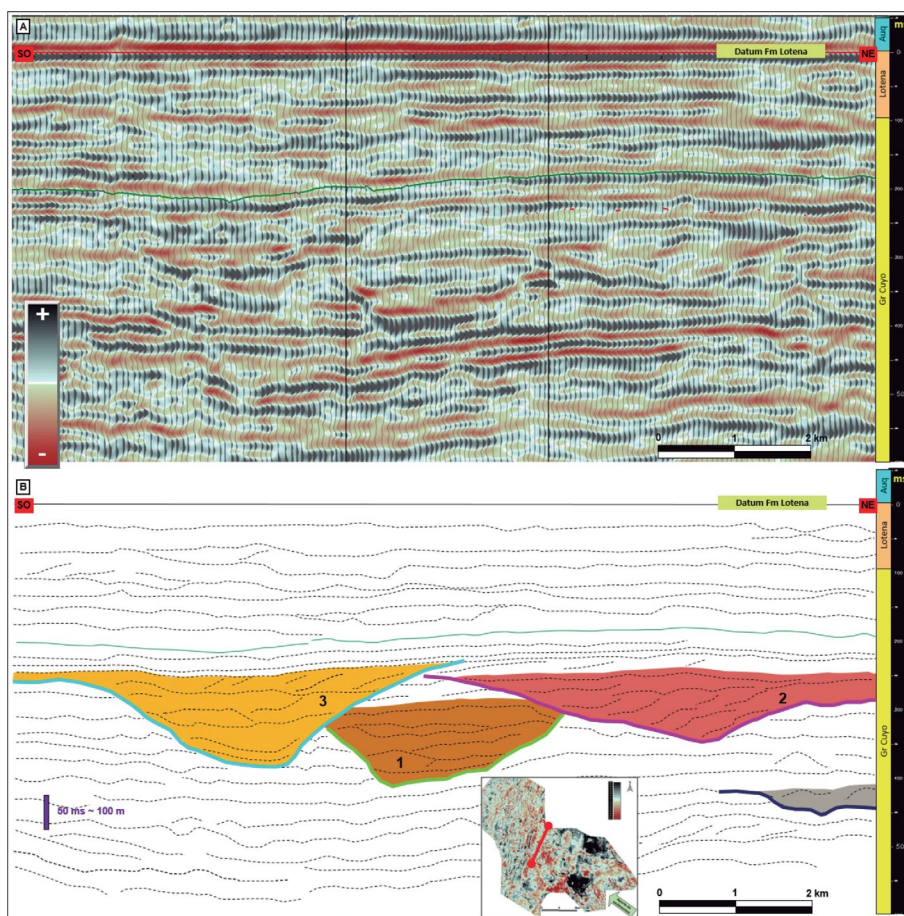


Figura 2. A) Línea sísmica PSTM arbitraria perpendicular al sentido de aporte de sedimentos y horizontalizada al tope de la Fm Lotena (datum). B) El patrón de apilamiento permite identificar discontinuidades por erosiones de gran escala, alcanzando hasta 200 m de incisión vertical y un rango de 3 a 5 km en la horizontal. A pesar de la alta concentración de incisiones interpretadas en la región es posible trabajar con su temporalidad para afianzar el mapeo regional: la incisión 1 es erosionada parcialmente por la incisión 2 y la incisión 3 erosiona parcialmente a las anteriores.

En la región analizada existe una baja densidad de pozos que atraviesan el Grupo Cuyo ya que la producción de hidrocarburos se concentra en los reservorios más someros, con características de porosidad y permeabilidad de tipo convencional. Estas geoformas de carácter erosivo no fueron aún perforadas ya que los pocos sondeos existentes priorizaron la investigación de entrapamientos ya conocidos (estructuras, filones, etc). Por lo tanto, con los pozos disponibles se calibraron las leyes de velocidad, los principales pases formacionales y la resolución vertical. Las geoformas identificadas fueron contrastadas con análogos publicados (Tesson *et al* 2015, Dalrymple 2012, Ngueutchoua y Giresse 2010, Verzi *et al* 2005, Posamentier y Allen 1999) y estudios de afloramientos.

Estos últimos tienen una gran calidad de exposición y una escala comparable con las secciones sísmicas. Muchos se han convertido en afloramientos clásicos del Grupo Cuyo y numerosos autores como Paim *et al* 2008, Leanza 2011, Legarreta y Ulliana 1996, Limeres 1996, Zavala 2001, 2002 entre otros, han descripto y caracterizado muchos de los ambientes sedimentarios y rasgos geomorfológicos que en este trabajo pudieron ser identificados en la sísmica. La escala es muy sensible en la interpretación sísmica, ya que su resolución vertical (25 metros en el dato de referencia aquí utilizado) pocas veces tiene la capacidad de resolver los espesores de los depósitos caracterizados en el afloramiento. Con una interpretación de detalle de ciertos marcadores con continuidad regional es posible detectar geoformas más sutiles por medio de cortes horizontales del cubo sísmico (horizon slice).

La sucesión estratigráfica fue estudiada a través de geomorfología sísmica y del análisis de facies sísmicas en el marco de la estratigrafía secuencial. La interpretación sísmica se inició con la identificación de patrones de terminación de reflectores y la definición de superficies claves (downlap, onlap y superficies de truncación). La identificación de las facies sísmicas se basó en el reconocimiento de la configuración de reflectores considerando su geometría, continuidad lateral, amplitud sísmica y frecuencia, tanto en vistas con orientación transversal al aporte sedimentario, de orientación perpendicular al mismo y en planta. El análisis de las facies sísmicas ayudó en la interpretación de los ambientes depositacionales, determinación de límites de secuencia y definición de los cortejos sedimentarios.

Con secciones perpendiculares (strike) a la dirección de progradación regional, O-NO, se analizó un área de 4000 km². En estas secciones (Fig. 2) se destacan los rasgos de corte y relleno presentes en el ámbito de plataforma y talud. A 120 km al noreste de la ciudad de Neuquén se reconoció una franja de 100 km de largo y 25 km de ancho con sentido sudoeste-noreste, caracterizada por incisiones de gran escala en el ámbito de plataforma y talud.

Las interpretaciones en secciones strike fueron calibradas con horizon slices (utilizando el dato sísmico horizontalizado del tope de la Formación Lotena) para una correcta identificación de los rasgos erosivos.

En planta, las incisiones pueden ser reconocidas por un patrón en V (Fig. 3), con distintos grados de sinuosidad y desarrollo sobre la plataforma o el talud. La mayor parte de estas geoformas

erosivas están asociadas a sistemas fluviales en zonas más proximales, las cuales pueden ser reconocidas sísmicamente.

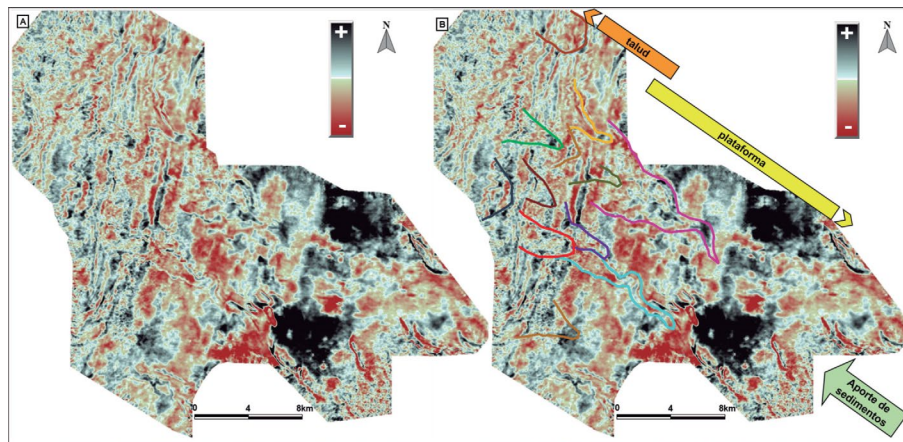


Figura 3. Vista en planta de un horizon slice del cubo sísmico PSTM horizontalizado al tope de Fm Lotena (datum). A) Horizon slice por debajo (+300 ms) del datum. Es posible reconocer geoformas (incisiones) en forma de V. B) Interpretación sobre horizon slice de discontinuidades por erosiones con distinto grado de incisión y que se son más jóvenes hacia el noroeste. También es posible diferenciar, según la actitud de los reflectores intersectados, algunos de los ambientes deposicionales dominantes para la región: plataforma, con reflectores plano paralelos; talud, con reflectores que buzanan al noroeste producto de la intersección con los foreset de las clinoformas.

En secciones paralelas a la dirección de aporte de sedimentos (dip) el mapeo de las incisiones interpretadas se ajustan con las discontinuidades que alteran la expresión sísmica predominantemente progradante de las clinoformas (Fig. 4). Estas discontinuidades fueron

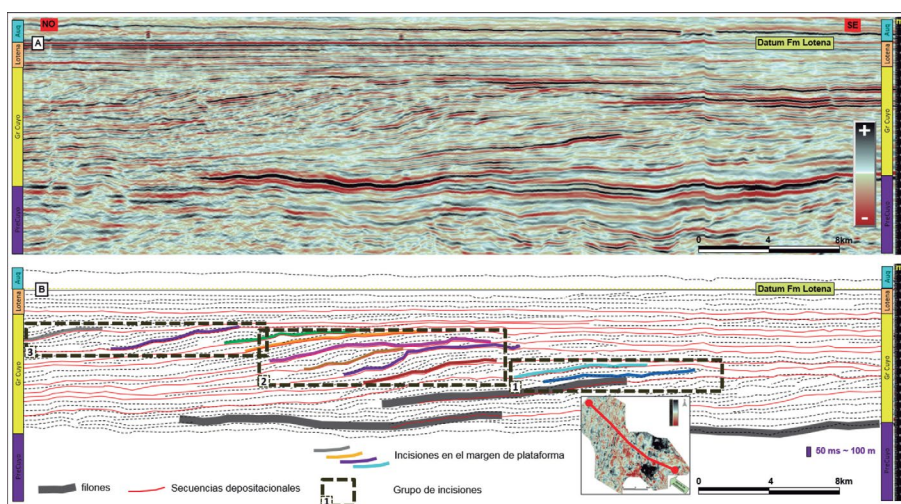


Figura 4. Línea sísmica PSTM arbitraria paralela al influjo de sedimentos y horizontalizada al tope de la Fm Lotena (datum). A) Las secciones paralelas a la dirección de aporte de sedimentos evidencian el patrón de apilamiento interno de las macroformas y el patrón de apilamiento entre macroformas y una marcada tendencia progradante del Grupo Cuyo en la zona de estudio. B) En la interpretación de la sección sísmica se reconocen las clinoformas y sus correspondientes ambientes de planicie abisal, talud y plataforma que se suceden en su progradación hacia el noroeste. La identificación de las discontinuidades por las incisiones labradas (en conjunto con otras vistas, figs. 4 y 5) en los ambientes de plataforma y talud, se asocian con desensos relativos del nivel del mar. Estas discontinuidades y sus continuidades correlativas son utilizados como límites para las secuencias deposicionales.

interpretadas como límites de secuencias depositacionales: unidades depositacionales limitadas por discontinuidades sub-aéreas o sus continuidades correlativas que representan las máximos descensos relativos del nivel del mar (Catuneanu 2006). Esta sucesión de discontinuidades se extienden a lo largo de más de 25 km y pueden subdividirse en grupos según la densidad de incisiones, siendo las más jóvenes las que se encuentran hacia el noroeste.

FACIES SÍSMICAS: DESCRIPCIÓN E INTERPRETACIÓN.

En el área de estudio, el rango de espesores asociados a la fms. Lajas y Los Molles (depósitos marinos del Grupo Cuyo) varía entre 600 metros en el extremo sudeste y 1200 metros hacia el noroeste (Figura 4). Este incremento de espesor hacia el noroeste es producto de la acumulación de las facies finas en el ambiente de cuenca profunda de la Fm Los Molles. La expresión sísmica predominante es la progradación de las clinoformas de talud (Fig. 5.B, facies sísmicas FS2 y FS3). Dentro de este complejo de clinoformas se han reconocido cinco facies sísmicas principales. En la Figura 5 se presenta un resumen de las principales características de las facies sísmicas y su correspondiente interpretación del ambiente de depositación.

Facies sísmica FS1 (abanicos de planicie abisal).

Esta facies consiste de clinoformas de bajo ángulo ($1-2^\circ$) con un relieve máximo de 50 ms (TWT, two way time), equivalente a 100 m aproximadamente y una extensión longitudinal máxima de 9 km. Estas clinoformas apoyan sobre las discontinuidades interpretadas como límites de secuencia, con un arreglo interno marcadamente paralelo y con terminaciones de reflectores en downlap. El sentido de progradación es opuesto al del aporte sedimentario, desde talud externo a cuenca abisal.

Las amplitudes varían desde altas en la base de los bottomset a moderadas en los foreset y topset. El patrón de apilamiento de esta facies sugeriría un sistema turbidítico retrogradante generado al pie del talud, junto a una geometría transversal suavemente convexa. Así, esta facies sísmica podría ser interpretada como abanicos de planicie abisal.

Facies sísmica FS2 (deltas de margen de plataforma).

Estas facies consiste de clinoformas progradantes de alto ángulo ($3-5^\circ$) con un relieve máximo de 150 ms (TWT), equivalente a 300 m aproximadamente y una longitud máxima de 12 km. Estas clinoformas se apoyan sobre la discontinuidad interpretada como límite de secuencia, en zonas próximas al quiebre de talud. Las terminaciones de los reflectores que la conforman son de tipo downlap hacia la cuenca y de tipo onlap marino sobre el talud y onlap costero hacia

la plataforma. Las amplitudes sísmicas varían de moderadas hacia las bases de los bottomset a bajas hacia los onlap. El patrón de apilamiento de esta facies podría ser indicador de un sistema altamente agradante (agradación >> progradación) con alta relación arena/arcilla, según el gradiente de las clinoformas (Patrino *et al* 2015), cercano al margen de plataforma. La geometría transversal elongada se encuentra parcialmente confinada a las insiciones y tiene características lobuladas, este hecho podría sugerir que los procesos de depositación están dominados por sistemas fluviales. Esta facies sísmica podría ser interpretada como depósitos de deltas de margen de plataforma.

Facies sísmica FS3 (clinoformas compuestas, deltas/shoreface sobre clinoformas de talud).

Esta facies sísmica consiste de clinoformas de pequeña escala y ángulo entre 3-5° progradando en fase sobre clinoformas de gran escala y menor ángulo (3-4°). El relive máximo es de 100 ms (TWT) equivalente a 200 metros aproximadamente, y tienen una longitud máxima de 7 km. Las clinoformas menores tienen un relieve de 20/30 ms (TWT), equivalente a 40-60 m aproximadamente, en tanto que las clinoformas mayores tienen un relieve de 80/70 ms (TWT), 160-

140 m. Las terminaciones de los reflectores son de tipo downlap en dirección a la cuenca sobre el límite de secuencia y facies sísmicas FS1. Hacia el tope de las clinoformas las terminaciones truncan contra el límite de secuencia. Las amplitudes sísmicas varían de moderadas en las bases de los bottomset hacia altas en los toplaps pobremente preservados. El patrón de apilamiento de esta facies indicaría un sistema predominantemente agradante (agradación > progradación) con alta relación arena/arcilla para las clinoformas pequeñas y una menor relación arena/arcilla para las clinoformas mayores, según el gradiente de las clinoformas (Patrino *et al* 2015). La geometría transversal elongada y la ausencia de características lobadas sugieren procesos de depositación dominados por oleaje (corrientes de deriva). Esta facies sísmica podría ser interpretada como depósitos de deltas/shoreface de margen de plataforma.

Facies sísmica FS4 (clinoformas de talud oblicuas-tangencial).

Esta facies sísmica consiste de clinoformas progradantes de ángulo medio (2-3°), con un relieve máximo de 150 ms (TWT), 300 m aproximadamente, y una longitud de 15 km. Las terminaciones de los reflectores son de tipo downlap y se depositan sobre las facies sísmicas FS3 en zonas de talud. En posiciones de cuenca (abisal) son paralelos (bottomset) sobre FS3. Hacia el tope de las clinoformas las terminaciones truncan contra el límite de secuencia. Las amplitudes sísmicas varían de bajas en las bases de los bottomset a moderadas en las truncaciones. El patrón de apilamiento de esta facies indicaría un sistema predominantemente progradante (agradación < progradación) y una relación arena/arcilla baja según el gradiente de las clinoformas. Esta facies sísmica se encuentra fuertemente erosionada y podría ser interpretada como el resultado de la progradación del talud.

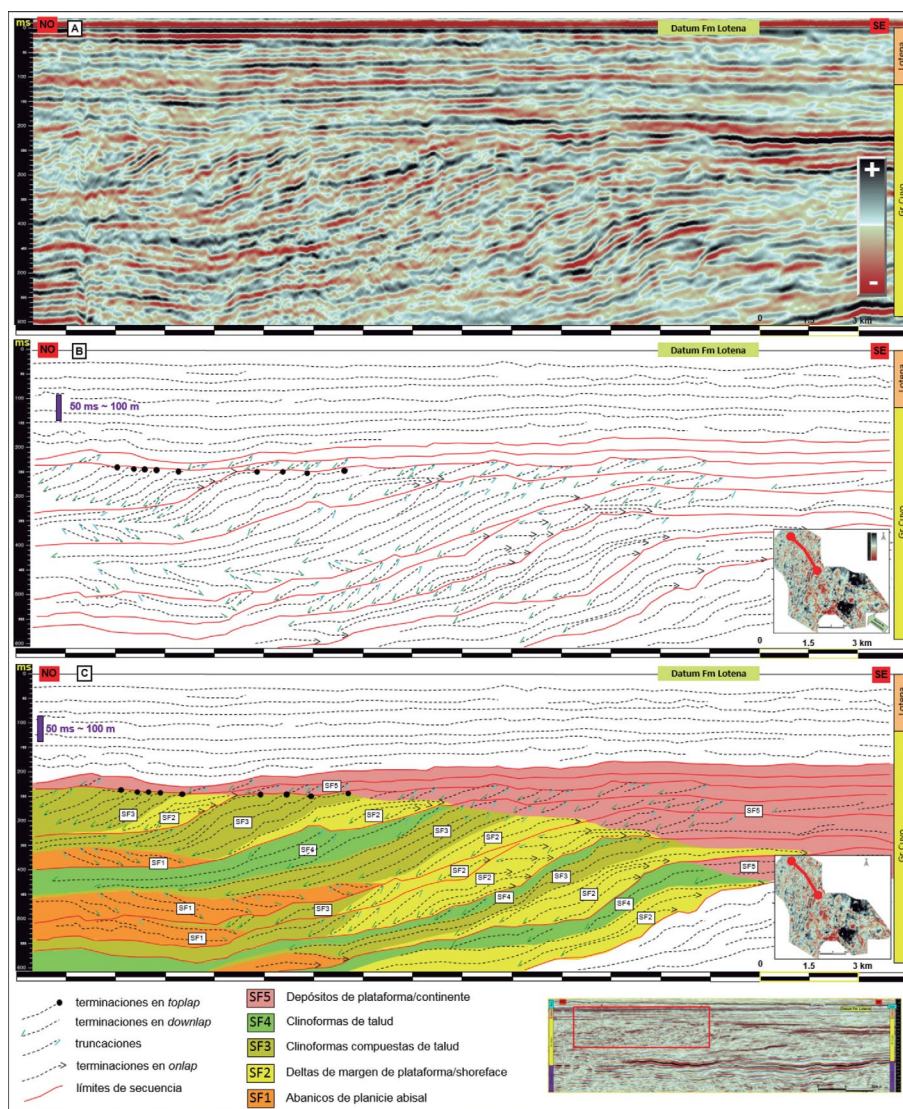


Figura 5. Ampliación del sector noroeste de la línea sísmica PSTM arbitraria de la Figura 7. A) La porción de dato sísmico correspondiente al Grupo Cuyo está dominada por la presencia de clinoformas que en su conjunto podrían subdividirse en: toposet (reflectores plano-parallel hacia el tope de las clinoformas), foreset (reflectores buzantes en la dirección de progradación) y bottomset (reflectores plano-parallel hacia la base de las progradaciones). B) Interpretación de los límites de secuencia según las terminaciones de los reflectores (truncación, onlap, toplap y downlap). C) Según el patrón de apilamiento de los reflectores y sus terminaciones se los agruparon en 5 facies sísmicas y estas fueron asignadas a diferentes ambientes depositacionales.

Facies sísmica FS5 (deltas de plataforma/shoreface a continental).

Esta facies sísmica consiste de clinoformas progradantes de pequeña escala y ángulo medio (2-3°), con relieve máximo de 20-30 ms (TWT), equivalente a 40-60 m aproximadamente, y una máxima extensión longitudinal de 9 km. Las terminaciones de los reflectores son de tipo downlap y se han depositado sobre las facies sísmicas FS2, FS3 y límites de secuencia. Las amplitudes sísmicas son bajas y presentan poca variación entre los bottomset y las truncaciones contra

los límites de secuencia. El patrón de apilamiento de esta facies indicaría un sistema altamente progradante (agradación <<progradación), con alta concentración de reservorios (alto porcentaje de arena/arcilla) y clinofomas de pequeña escala. La geometría transversal elongada y la ausencia de características lobadas sugieren procesos de depositación dominados por oleaje (corrientes de deriva). Esta facies sísmica podría ser interpretada como depósitos de deltas/shoreface de plataforma a costero litoral.

GEOMORFOLOGÍA SÍSMICA

El intervalo en donde se concentran las incisiones corresponde al Aaleniano - Bajociano medio, estimado a partir de estudios regionales de Brinkworth *et al* (2017).

La interpretación paleoambiental se correlaciona con lo observado al sudoeste del área de estudio, donde los datos sísmicos 3D fueron calibrados con pozos profundos y se pudo observar una alternancia de cortejos de alta y baja acomodación en más de 1000 m de sedimentos no marinos. Estos cambios del espacio de acomodación, se interpretan como descensos del nivel de base del sistema fluvial, asociado, por la cercanía, al nivel relativo del mar. Estas variaciones en el sistema fluvial tienen su expresión en forma de incisiones labradas en el talud y plataforma.

Según la clasificación de las incisiones del talud y del margen de plataforma (Harries y Whiteway 2011) existen tres tipos de cañones submarinos:

- Los cañones submarinos de tipo 1 son aquellos que inciden el ámbito de plataforma y tienen conexión directa con sistemas fluviales y cabeceras.
- Los cañones de tipo 2 inciden la plataforma pero no están vinculados a sistemas fluviales.
- Los cañones de tipo 3 son exclusivos del ámbito del talud (cañones ciegos).

Los cañones de tipo 1 y 2 pueden actuar como vías de transporte de flujos gravitacionales de sedimentos en momentos de mar bajo. Los cañones de tipo 3 en cambio, evolucionan por erosión retrogradante (procesos de remoción en masa) y podrían convertirse, en su etapa madura, en cañones de tipo 2. Por lo tanto, las mejores oportunidades de ocurrencia de reservorios asociados a abanicos submarinos, flujos turbidíticos, deltas de margen de plataforma tipo I (Plink-Bjorklund y Steel 2004) y valles incisos, están asociadas principalmente a los cañones tipo 1 y en segundo plano a los tipo 2.

Un claro ejemplo de cañones submarinos, tipo 2 / tipo 1 según esta clasificación, fueron identificados en la región de la Dorsal de Huincul (Raggio *et al* 2007, Verzi *et al* 2005, Gómez Omil *et al* 2002) incidiendo las pelitas marinas de la Fm Los Molles en ambiente de talud. A partir de datos de pozos lograron estimar la variación de la concentración de reservorios (net to gross): desde 35% en zonas de incisiones proximales hasta 60% en zonas distales, donde la depositación predomina por sobre la incisión debido a la desaceleración del flujo por pérdida de gradiente (Mutti *et al* 1999).

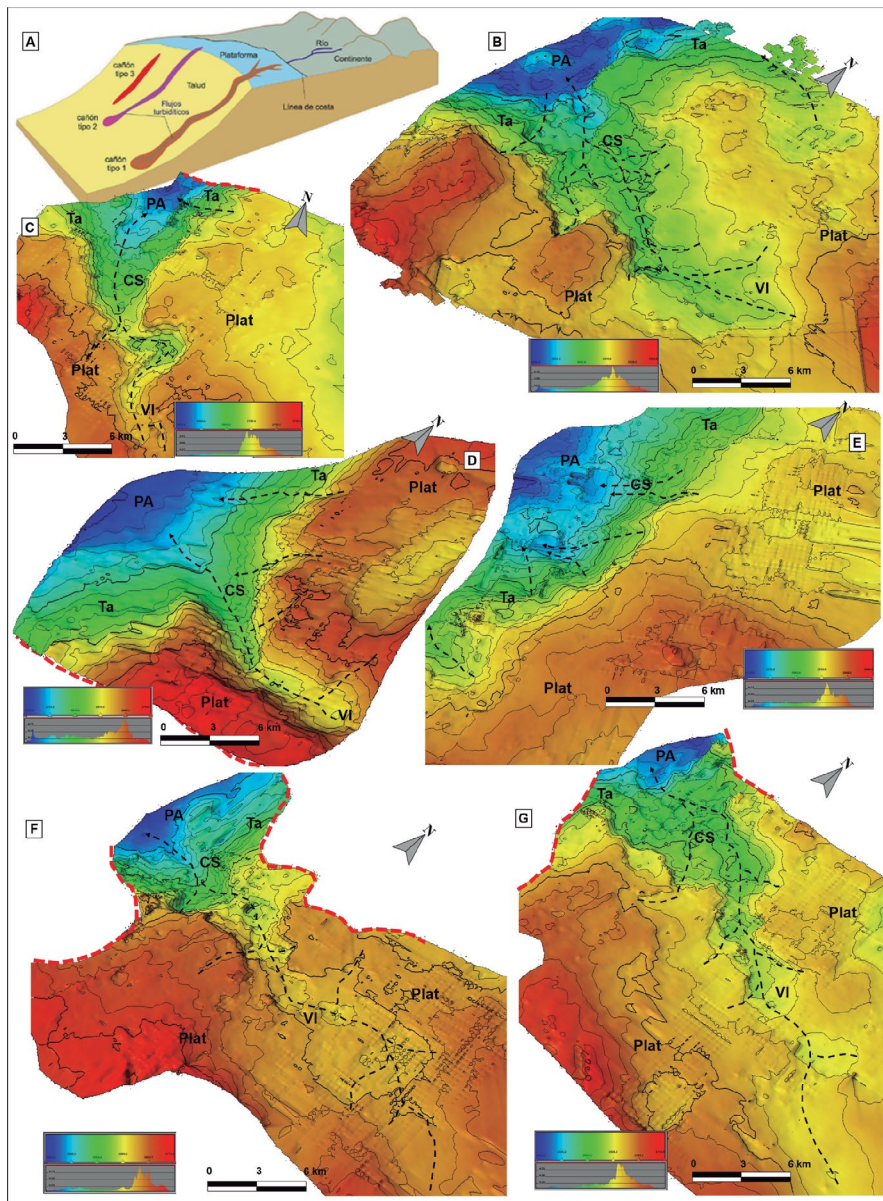


Figura 6. Vista 3D de algunas de las incisiones interpretadas en el dato sísmico PSTM. A) Clasificación de cañones submarinos según Bozzano et al (2017). B) Cañón tipo 1, conectado a plataformas y valle inciso; C) Cañón tipo 1/2, conectado a plataforma y posible valle inciso; D) Cañón tipo 1/2, conectado a plataforma y posible valle inciso; E) Cañones tipo 3, desarrollado sólo en talud; F) Cañón tipo 1, conectado a plataformas y valle inciso; G) Cañón tipo 1, conectado a plataforma y valle inciso. Plat= plataforma; VI= valle inciso; CS= cañón submarino; Ta= talud; PA= planicie abisal. Flechas negras: dirección del flujo. Líneas punteadas rojas: superficie erosionada.

La regresión normal representada por la migración del margen de plataforma hacia el noroeste desarrolla, a menor escala, una ciclicidad de transgresiones y regresiones que generan superficies de máxima inundación de menor orden. Desde el punto de vista del sistema petrolero, esas transgresiones podrían generar sellos parciales o totales, esenciales para la identificación del play. Estos pequeños ciclos tienen un espesor menor a la resolución vertical de la sísmica, sin embargo pueden ser detectados a través de la trayectoria de la línea de costa (Fig. 7).

DISCUSIÓN

El Jurásico medio (Aaleniano-Bajociano) en el sector central de la Cuenca Neuquina es un caso de estudio que permite evaluar los efectos de la variación relativa del nivel del mar sobre la arquitectura estratigráfica del margen de plataforma y sobre el control de los sedimentos transferidos hacia ambientes sedimentarios de aguas profundas. En la Figura 8 se presenta un modelo geológico conceptual donde se resumen las principales características observadas.

Si bien en el intervalo estudiado las regresiones forzadas son un elemento con alta representación, a lo largo del período de tiempo analizado, la tendencia de la trayectoria del margen de la plataforma es ascendente. Es decir, que existen un predominio de procesos de agradación y progradación. El desplazamiento en el plano horizontal del borde de plataforma durante el Aaleniano-Bajociano (6 Ma aprox.) fue de 30 km en dirección noroeste, lo que da una tasa de progradación promedio de 5 km/Ma (Fig. 9). Con una tasa de agradación estimada de 100 m/Ma para la misma zona de estudio y período de tiempo, la relación progradación/agradación arroja un valor de 50. Este número es un indicador de aporte de sedimentos moderado según la clasificación de Carvajal *et al* (2009) y la trayectoria del borde de plataforma se encuentra en el campo de ligeramente creciente a moderadamente creciente de acuerdo a Paumard (2018).

Las progradaciones son relativamente uniformes en sentido transversal al aporte sedimentario según indican los trabajos regionales, indican márgenes de plataforma lineares o de baja sinuosidad. Ésto podría ser el resultado de avenidas catastróficas con desarrollo de flujos hiperpícnicos, fuentes de aporte de sedimentos múltiples (sistemas fluvio/deltaicos pequeños) o procesos de acción

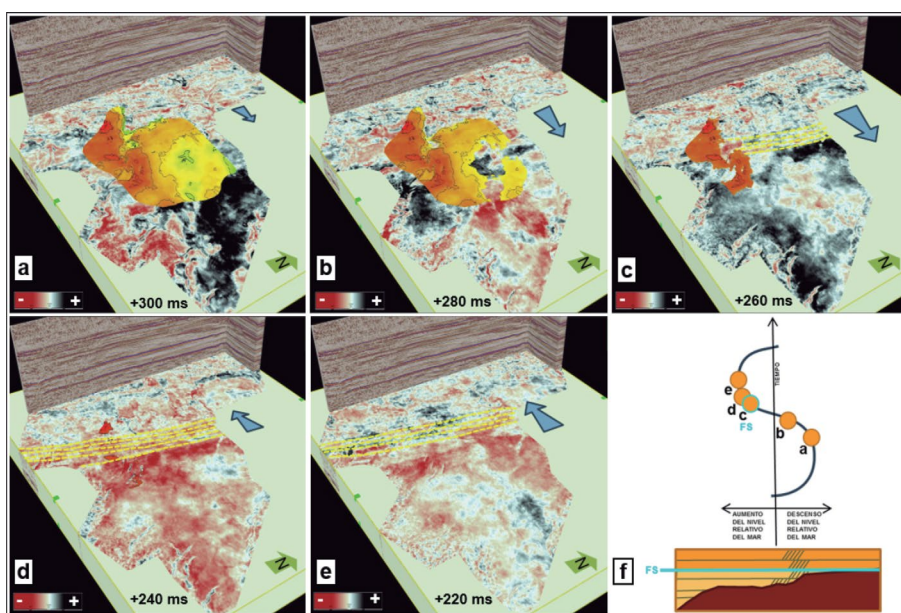


Figura 7. Superposición de geoformas y cubo PSTM horizontalizado (datum Fm Lotena). La secuencia de cuadros a-b-c-d-e muestran el relleno de una incisión y la trayectoria de la línea de costa durante la transgresión-regresión evidenciado por geoformas asociadas a cordones litorales. En la figura f) se resume la trayectoria según el nivel relativo del mar.

marinos (corrientes de deriva litoral) que redistribuyen los sedimentos a lo largo de la plataforma. Lo último parece ser el mecanismo más probable ya que se han reconocido sistemas fluviales de gran magnitud. Sin embargo, durante los períodos de mar bajo la linearidad de la plataforma se ve interrumpida por las incisiones como resultado de la concentración de sistemas fluviales (Fig. 9).

El modelo depositacional altamente progradante para el Grupo Cuyo en la zona de estudio, se encuentra interrumpido por numerosas incisiones del margen de plataforma que podrían ser agrupados en al menos tres ciclos de descenso relativo del nivel de base para la sección media/alta del Grupo Cuyo (Fig. 4.B). Estos episodios son el resultado de cambios en el espacio de acomodación, donde alternan situaciones de acomodación negativa con acomodación positiva. El resultado es exposición parcial y erosión de la plataforma, desplazamiento de ambientes depositacionales hacia la cuenca y posterior inundación. Estos períodos de nivel de mar bajo relativo pueden ser interpretados como variaciones de menor orden dentro de la rama ascendente de orden mayor (progradación-agradación en nivel de mar alto relativo). Algunas de estas discordancias interpretadas en sísmica 3D se podrían correlacionar con discontinuidades reconocidas y descritas en afloramientos, tales como la Seguélica y la Lohanmahuídica (Leanza 2009).

Los valles incisos se generan por exposición sub-aérea de la plataforma y posterior erosión fluvial, como resultado de un descenso relativo del nivel de base (plataforma total/parcialmente expuesta). El relleno posterior puede contener desde facies de canales fluviales de alta energía amalgamados, facies estuarinas, deltas de margen de plataforma hasta pelitas marinas en transgresiones rápidas. Los cañones submarinos, en cambio, son usualmente por procesos de remoción en masa (slumping, mudflows, etc.) en períodos de nivel relativo del mar bajo y alto (Catuneanu 2009). Generalmente, durante períodos de mar bajo relativo, son eficientes conductos de sedimentos hacia aguas profundas, generando abanicos submarinos. Se encuentran rellenos por pelitas y/o psamitas de depósitos turbidíticos. Una de las principales características para diferenciarlos es el mapeo de la posición del quiebre de plataforma en los diferentes escalones temporales analizados, ya que los valles incisos se localizan desde el quiebre de plataforma hacia el continente y los cañones submarinos desde el quiebre de plataforma hacia la cuenca (Fig. 6).

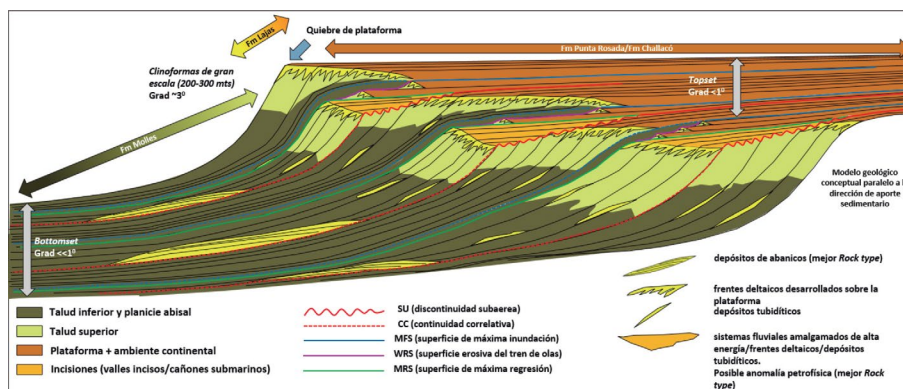


Figura 8. Modelo geológico conceptual para una sección paralela a la dirección de aporte sedimentario. Los reservorios asociados a los cortejos de mar bajo (LST-FSST) se proponen como candidatos para preservar en mejores condiciones las características petrofísicas originales.

Las geoformas erosivas interpretadas en el margen de plataforma podrían tener un carácter compuesto ya que muchos de los cañones submarinos se desarrollan hasta y sobre el margen continental, posibilitando procesos de captura sobre los valles incididos en la plataforma. Debido a que los primeros se desarrollan tanto en períodos de nivel de mar bajo relativo como de mar alto relativo y los segundos, exclusivamente en nivel de mar bajo relativo, no fue posible aún resolver el orden temporal de cada uno los eventos. Si a la complejidad anterior se le agrega la limitación de la resolución sísmica vertical (25 metros aproximadamente) entonces podrían ser los datos aportados por perforaciones los que contribuyan a separar los depósitos de estos ambientes sedimentarios.

Los descensos relativos del nivel del mar se estimaron entre 50 y 80 metros. Estos se calcularon sobre las erosiones más externas de los valles incisos, sobre la plataforma y fuera de la conexión (posible captura) con los cañones submarinos. De esta manera, las magnitudes de las caídas relativas del mar dejarían parcialmente expuestas a las plataformas interpretadas en el período Aaleniano-Bajociano.

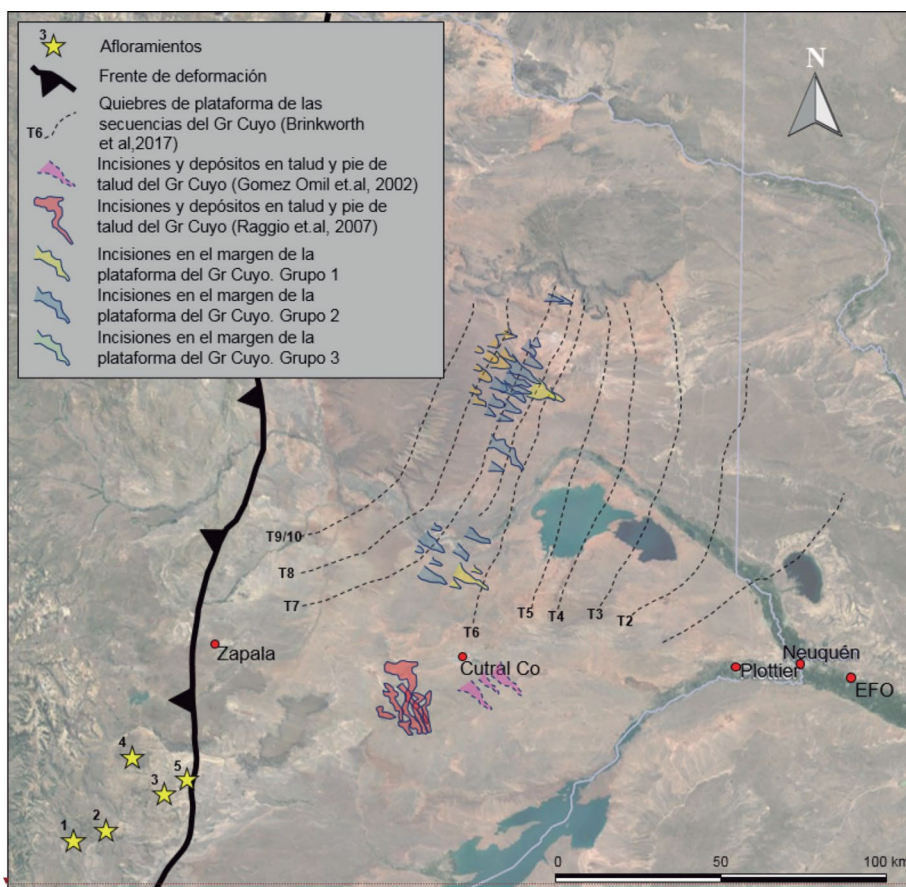


Figura 9. Vista en planta, sobre imagen satelital, del desarrollo de las incisiones interpretadas sobre la plataforma-talud del Grupo Cuyo para el intervalo de tiempo Bajociano-Alleniano (6 Ma aprox). Estas incisiones cubren un área de 100 km de extensión por 25 km de ancho. Se reconocen zonas con alta concentración de incisiones, posibles zonas de sistemas fluviales amalgamados y alto aporte sedimentario. Podría existir una posible conexión temporal con las incisiones descritas en afloramientos. Afloramientos: 1. La Jardinera - Fortín 1º Mayo (Paim *et al* 2008, Vann 2013, Tudor 2014, Olariu *et al* 2017); 2. Arroyo Lapa - Espinazo del Zorro (Limeres 2017); 3. Quebrada del Sapo - Bajada de Los Molles (Freije *et al* 2002, Zavala 2003); 4. Lohan Mahuida (Zavala 2003); 5. Picún Leufú (Arregui *et al* 2011, Zavala 2003).

Algunas de las geoformas compuestas (valles incisos-cañon submarino) interpretadas superan los 16 km de longitud, con 5 km de ancho y 200 m de espesor en el sector más externo y 500 m / 20 m respectivamente en la plataforma interna. En las zonas de alta concentración de incisiones (Fig. 9), la distribución areal y superposición de los distintos valles incisos y cañones submarinos pueden alcanzar los 400 km² de extensión, 600 m de espesor total de columna de interés (con un espesor útil estimado en un tercio). Estos valores se encuentran en el orden de magnitud de los yacimientos que explotan los reservorios asociados a estos ambientes.

El carácter puramente estratigráfico de este tipo de entrapamiento (corte y relleno) lo hace independiente de factores estructurales. Por lo tanto, la presencia y eficiencia del sello es el factor crítico de este play, ya que los potenciales reservorios (asociados a diferentes ambientes de depositación) pueden estar, o no, conectados con otros que actúen como puntos de fuga del entrapamiento. Por lo tanto, la clave está en el entendimiento y reconocimiento de los quiebres de plataforma, las variaciones laterales de facies y superficies de inundación.

El carácter puramente estratigráfico de este tipo de entrapamiento (corte y relleno) lo hace independiente de factores estructurales. Por lo tanto, la presencia y eficiencia del sello es el factor crítico de este play, ya que los potenciales reservorios (asociados a diferentes ambientes de depositación) pueden estar, o no, conectados con otros que actúen como puntos de fuga del entrapamiento. Por lo tanto, la clave está en el entendimiento y reconocimiento de los quiebres de plataforma, las variaciones laterales de facies y superficies de inundación.

CONCLUSIONES

A partir del estudio de las interpretaciones del dato sísmico 3D y el análisis del patrón de aplilamiento de los reflectores asociados al lapso Aaleniano-Bajociano, algunas conclusiones generales pueden extraerse sobre los controles en la migración del margen de la plataforma y los depósitos asociados a ella:

1. Se mapearon numerosas y claras discontinuidades a lo largo del ámbito plataforma-margen de plataforma- talud que se suceden e interaccionan (corte y relleno) con dirección hacia el noroeste durante el período Aaleniano-Bajociano y que se asociaron a límites de secuencias. Estas modulan la tendencia progradante-agradante del Grupo Cuyo a lo largo de una franja de 100 km de largo y 30 km de ancho de sentido SO-NE. Esto plantea la posibilidad de existencia de probables entrapamientos estratigráficos aún en zonas carentes de estructuras o paleoestructuras.
2. Las facies sísmicas interpretadas para los rellenos de las incisiones, se asocian a reservorios de alta energía y mejores características petrofísicas originales (mejores potenciales reservorios). Esta consideración se relaciona con la transferencia de sedimentos desde zonas proximales (margen continental) hacia zonas distales (margen de plataforma y aguas

profundas) y la magnitud de las variaciones relativas de nivel del mar. Las sísmofacies incluyen reservorios asociados a abanicos submarinos y deltas/shoreface de margen de plataforma, FS1-FS2-FS3 (asociados a regresiones forzadas), como deltas y shoreface de regresión normal (FS4 y FS5).

3. La caracterización geomorfológica de las incisiones mapeadas permitió diferenciar las clases de cañones submarinos y cuándo pueden estar en contacto, por medio de procesos de captura, con sistemas fluviales en la plataforma (valles incisos). Las geoformas compuestas, cañon submarino-valle inciso o cañon Tipo 1, son las más eficientes para transportar sedimentos hacia aguas profundas.
4. Un elemento del sistema petrolero de gran importancia que pudo ser identificado indirectamente por medio de la geomorfología sísmica fue el sello. Su presencia puede inferirse a partir del cambio de dirección de la trayectoria de la línea de costa, interpretada con horizon slices. Cada límite de secuencia interpretado tiene distintos sellos (totales o parciales) para los potenciales reservorios involucrados en cada unidad limitada por discontinuidades. Por este motivo el sello es el factor crítico de este play.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a YPF.S.A. por la autorización para publicar este trabajo y a su grupo técnico por sus aportes.

Un especial agradecimiento a Ricardo Fabián Domínguez por su continua colaboración, comentarios constructivos y recomendaciones bibliográficas y a Tomas D'Biassi por sus comentarios sobre los datos sísmicos utilizados en este trabajo.

REFERENCIAS CITADAS

- Arregui, C., O. Carbone, R. Martinez, 2011. El Grupo Cuyo (Jurásico temprano-medio) en la Cuenca Neuquina. Relatorio del XVIII Congreso Geológico Argentino, Neuquén 2011 Pag: 77-89.
- Bozzano, G., J. Martín, D.V. Spoltore, R.A. Violante, 2017. Los cañones submarinos del margen continental argentino: una síntesis sobre su génesis y dinámica sedimentaria. *Latin American journal of sedimentology and basin analysis*. Volumen 24 (1) 2017, pag: 85-101.
- Brinkworth, W., G. Vocaturo, M.L. Loss, D. Giunta, E. Mortaloni y J.L. Massaferró, 2017, "Integración regional de subsuelo orientado a la exploración y desarrollo de Grupo Cuyo, Cuenca Neuquina", XX Congreso Geológico Argentino, Tucumán.
- Carvajal, C., A.P. Ron Steel, 2009. Sediment supply: The main driver of shelf-margin growth. *Earth-Science Reviews* 96 (2009) 221–248.
- Catuneanu, O., 2006. *Principles of Sequence Stratigraphy*. Elsevier, Amsterdam, 375 pp.

- Catuneanu, O., Abreu, V., Bhattacharya, J.P., Blum, M.D., Dalrymple, R.W., Eriksson, P.G., Fielding, C.R., Fisher, W.L., Galloway, W.E., Gibling, M.R., Giles, K.A., Holbrook, J.M., Jordan, R., Kendall, C.G.S.C., Macurda, B., Martinsen, O.J., Miall, A.D., Neal, J.E., Nummedal, D., Pomar, L., Posamentier, H.W., Pratt, B.R., Sarg, J.F., Shanley, K.W., Steel, R.J., Strasser, A., Tucker, M.E., Winker, C., 2009. Towards the standardization of sequence stratigraphy. *Earth Sci. Rev.* 92, 1–33.
- Dalrymple, R., 2012. Incised Valleys in time and space: an introduction to the volume and an examination of the controls on valley formation and filling. SEPM Special Publication No. 85, ISBN 1-56576-122-7, p. 5-12.
- Freije, H., G. Azúa, R. Gonzalez, J.J. Ponce, C. Zavala, 2002. Actividad tectónica sedimentaria en el jurásico del sur de la cuenca Neuquina. V Congreso de Exploración y desarrollo de Hidrocarburos.
- Gómez Omil, R., J. Schmithalter, A. Cangini, L. Albariño, A. Corsi, 2002. El Grupo Cuyo en la Dorsal de Huincul, Consideraciones Estratigráficas, Tectónicas y Petroleras. Cuenca Neuquina. 5° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos (Mar del Plata), Actas en CD: 22 p.
- Groeber, P. 1929. Líneas fundamentales de la geología del Neuquén, sur de Mendoza y regiones adyacentes. Dirección Nacional de Geología y Minería, Publicación 58, 110 pp., Buenos Aires.
- 1947. Observaciones geológicas a lo largo del Meridiano 70°. 3. Hojas Domuyo, Mari Mahuida, Huar Huar Co y parte de Epu Lauquen. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 2(4): 347-08. Buenos Aires.
- Gulisano, C.A., A. Gutiérrez Pleimling & R.E. Digregorio. 1984b. Esquema estratigráfico de la secuencia jurásica del oeste de la provincia del Neuquén. IX° Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 236-259. Buenos Aires.
- Leanza, H.A. & C.A. Hugo. 1995. Revisión estratigráfica del Cretácico inferior continental en el ámbito sudoriental de la Cuenca Neuquina. *Revista Asociación Geológica Argentina*, 50(1-4): 30- 2. Buenos Aires.
- Leanza, H., 2009. Las principales discordancias del Mesozoico de la Cuenca Neuquina según observaciones de superficie. *Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales*, n.s. 11(2): 145--184.
- Leanza, H.A., A. Mazzini, F. Corfu, E.J. Llambías, H. Svensen, S. Planke, O. Galland, 2013. The Chachil Limestone (Pliensbachian-earliest Toarcian) Neuquén Basin, Argentina: U-Pb age calibration and its significance on the Early Jurassic evolution of southwestern Gondwana.
- Legarreta, L. & M.A. Uliana. 1996. The Jurassic succession in west-central Argentina: stratal patterns, sequences and paleogeographic evolution. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 120: 303-330.
- Legarreta, L. & C.A. Gulisano. 1989. Análisis estratigráfico secuencial de la cuenca Neuquina (Triásico superior - Terciario inferior). En: G.A. Chebli & L.A. Spalletti (eds.), *Cuencas Sedimentarias Argentinas*, 221-243.
- Limeres, M., 1996. Sequence stratigraphy of the Lower - Middle Jurassic in southern Neuquén: implication for unravelling synsedimentary tectonics along the Huincul wrench system. En: A.C. Riccardi (ed.), *Advances in Jurassic Research*. Georesearch Forum, 1-2 : 275-284. Zurich.
- Limeres, M., 2017. Informe inédito. Grupo Cuyo: estratigrafía, facies y Tectónica. Cuenca Neuquina, Sector sur. Guía de campo.

- Harries, H. y T. Whiteway, 2011. Global distribution of large submarine canyons: Geomorphic differences between active and passive continental margins. *Marine Geology* n°285 (2011), pag:69-86.
- Kamo, S.L. y A.C. Riccardi, 2009. A new U-Pb zircon age for an ash layer at the Bathonian-Callovian boundary, Argentina. *GFF*, 131, 177-182.
- Mutti, E., Tinterri, R., Remacha, E., Mavilla, N., Angella, S., & Fava, L., 1999. An introduction to the analysis of ancient turbidite basins from an outcrop perspective. AAPG Continuing Education Course Note Series No. 39, 61.
- Naipauer, M., W. Brinkworth, M.L. Loss, G. Vocaturo, D. Giunta, E. Mortaloni, 2017. Estudio integral de datos geocronológicos (edades U-Pb) y sísmicos en el subsuelo del engolfamiento neuquino: edades máximas de sedimentación y áreas de aporte para el Grupo Cuyo.
- Ngueutchoua, G. y P. Giresse, 2010. Sand bodies and incised valleys within the Late Quaternary Sana-ga-Nyong delta complex on the middle continental shelf of Cameroon. *Marine and Petroleum Geology* 27 (2010) 2173-2188.
- Olariu, C., R.J. Stell, N.K. Vann, R. Winter, E. Tudor, M. Shin, 2017. Recognition of shelf-margin clinoforms in outcrops; illustrated from Jurassic Las Lajas – Los Molles formations, S. Neuquen Basin, Argentina. *SEPM Research Conference: Propagation of Environmental Signals within Source-to-Sink Stratigraphy*.
- Paim, S.G., A.S. Silveira, E.L.C. Lavina, U.F. Faccini, H.A. Leanza, J.M.M. Teixeira de Oliveira & R.S.F. D'Avila. 2008. High resolution stratigraphy and gravity flow deposits in the Los Molles Formation (Cuyo Group - Jurassic) at the La Jardinera region, Neuquén Basin. *Revista de la Asociación Geológica Argentina. Simposio Jurásico de América del Sur*. 63(4): 728-753. Buenos Aires.
- Patrino, S., G.J. Hampson, C.A-L. Jackson, 2015. Quantitative characterisation of deltaic and subaqueous clinoforms. *Earth Science Review* 142, P:79-119.
- Paumard, V., Bourget, J., Payenberg, T., Bruce Ainsworth, B., George, A.D., Lang, S., Posamentier, H.W., Peyrot, D., 2018. Controls on shelf-margin architecture and sediment partitioning during a syn-rift to post-rift transition: Insights from the Barrow Group (Northern Carnarvon Basin, North West Shelf, Australia). *Earth-Science Reviews* 177 (2018) 643–677.
- Plink-Borklund, P. y Steel, R., 2004. Deltas on falling-stage and lowstand shelf margins, the Eocene central basin of Spitsbergen: importance of sediment supply. *SEPM, spec. special publication* N°83.
- Posamentier, W.H. and G.P. Allen, 1999. *Siliciclastic Sequence Stratigraphy-concepts and applications*. SEPM (Society for Sedimentary Geology) Robert W. Dalrymple, Editor of Special Publications Concepts in Sedimentology and Paleontology N°7, Tulsa, Oklahoma, U.S.A.
- Raggio, F., G. Lopez Pezè, F. Späth, M. Atencio, 2014. Modelo de gas de centro de cuenca (basin-centered gas system) en la Formación Lajas. Un desafío exploratorio no convencional en el ámbito del engolfamiento neuquino. IX Congreso de Exploración y desarrollo de Hidrocarburos.
- Raggio, F., A. Ortin, C. Martinez, P. Uzzo, 2007. Neural Network and 3D Seismic Techniques Improve the Prediction of Facies Distribution within a Submarine Channel Complex. Neuquén Basin, Argentina. *SPE-107716-PP*
- Schiuma, M. y E.J. Llambías, 2008. New ages and chemical analysis on Lower Jurassic volcanism close to the Huincul High, Neuquén. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 63(4), 644--6652.

- Silvestro, J. & M. Zubiri, 2008. Convergencia oblicua: Modelo estructural alternativo para la Dorsal Neuquina (39° S), Neuquén. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 63(1): 49-64.
- Tesson, M., H. Posamentier, B. Gensous, 2015. Compound incised-valley characterization by high-resolution seismic in a wave-dominated setting: Example of the Aude and Orb rivers, Languedoc inner shelf, Gulf of Lion, France. *Marine Geology* 367 (2015) 1-21.
- Tudor, E., 2014. Facies variability in deep water channel to lobe transition zone: Jurassic Los Molles Formation, Neuquén basin, Argentina. Thesis Presented to the Faculty of the Graduate School of The University of Texas at Austin in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in Geological Sciences The University of Texas at Austin.
- Vann, N.K., 2013. Slope to Basin-floor Evolution of Channels to Lobes, Jurassic Los Molles Formation, Neuquén Basin, Argentina. Thesis: Presented to the Faculty of the Graduate School of The University of Texas at Austin in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in Geological Sciences The University of Texas at Austin.
- Verzi, H., M.E. Raggio & M. Suárez. 2005. Volume interpretation of a turbidite system, Los Molles Formation, Neuquén Basin, Argentina. En: D. Soubies, M. Arteaga & F. Fantín (eds), *La sismica de reflexión más allá de la imagen estructural*. Vº Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Actas, Mar del Plata, pp. 219-226.
- Zavala, C. & H. Freije. 2002. Cuñas clásticas jurásicas vinculadas a la Dorsal de Huincul. Un ejemplo del área de Picún Leufú, Cuenca Neuquina, Argentina. Vº Congreso de exploración y desarrollo de Hidrocarburos. 14 pp. Versión CD. Mar del Plata.
- Zavala, C & R. González. 2001. Estratigrafía del Grupo Cuyo (Jurásico inferior-Medio) en la Sierra de Vaca Muerta, Cuenca Neuquina. *Boletín de Informaciones Petroleras*, Tercera Época, año XVII, 65: 40-54.
- Zavala, C., 2003. Informe inédito. Nuevas perspectivas en la exploración petrolera de la cuenca Neuquina. Guía de Campo.



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

**Energía y Sociedad
aliados inseparables
Mendoza 2018**