

10º Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos
Simposio de Recursos No Convencionales: Hacia una Nueva Convención

ESTRATIGRAFÍA DE ALTA RESOLUCIÓN Y SU IMPLICANCIA PARA EL MODELADO 3D DE RESERVORIOS EN LA FORMACIÓN LAJAS (GRUPO CUYO) – ANTICLINAL DE PICÚN LEUFÚ – CUENCA NEUQUINA

**Miguel de Moraes Lima Silveira¹, Carlos Daniel Arregui², Guilherme Pederneiras Raja Gabaglia¹,
Gonzalo Diego Veiga³, Daniel Galvão Carnier Fragoso¹**

1: Petrobras S.A., miguel.silveira@petrobras.com.br, guilhermeraja@petrobras.com.br,
danielfragoso@petrobras.com.br

2: Pampa Energia, carlos.arregui@pampaenergia.com

3: Centro de Investigaciones Geológicas, veiga@cig.museo.unlp.edu.ar

Palabras clave: Lajas, estratigrafía, reservorios

ABSTRACT

High Resolution Stratigraphy and its implications on 3D modeling of Lajas Formation (Cuyo Group) reservoirs – Picún Leufú Anticline – Neuquén Basin

In the South part of the Neuquén basin (Picún Leufú anticline), the Jurassic deposits of the Lajas Formation have outcropping sections with very good state of preservation and high lateral continuities. These characteristics favor the use of these rocks as analogues for hydrocarbon reservoirs.

Several previous researchers have studied this geological Formation. The section, constituted by fluvio-deltaic deposits, presents, according to others researchers, three sedimentary sequences of low frequency (3rd order). They also recognize a major regional unconformity (Intrabajocian) that is recognize over all the extensión of the Huincul's Dorsal, between the first and second sequences, which divides the analyzed unit into two sections.

The present work was carried out in the lower portion of the Lajas Formation below the mentioned regional unconformity. Two (predominantly progradational) sequences of low (>8 km extension) and ten of medium (3-8 km) frequencies - corresponding to the previous 3rd and 4th orders - were described. The definition and mapping of high frequency sequences (<300 m) is one of the contributions of this article.

From the data collected in the 19 outcrop sections, the sedimentological and paleogeographic characterizations of the analyzed section were established. The stratigraphic framework defined and applicable to the study area is based on the individualization of medium frequency sequences and was very important for the preparation of 3D geological models.

The stratigraphic analysis of the medium frequency sequences allowed identifying that the progradation of the deltaic system varied from 250° to 350°. The observation of the high frequency sequences enhance the understanding of vertical distribution and lateral extension of permeability barriers (fade out?) and sandy bodies (potential reservoirs).

The results obtained from the simulations of facies, with different provided data (bibliographic vs. field-collected), showed qualitatively and quantitatively the degree of success that high-resolution stratigraphy can bring to 3D reservoir modeling and to its application in the optimization of hydrocarbon exploitation.

INTRODUCCIÓN

La construcción de modelos geológicos 3D de facies se construyen utilizando gran cantidad de herramientas matemáticas y conceptos sedimentológicos desarrollados en los últimos 50 años usados a diario para la confección de modelados geológicos lógicos y son claramente dependientes del conocimiento de las metodologías de análisis estratigráfico. Especialmente el desarrollo de reservorios maduros necesita de un abordaje de alta resolución con nivel de detalle superior a los análisis realizados según la lógica clásicamente usada en la estratigrafía secuencial.

Esencialmente la estratigrafía secuencial analiza el resultado de la variación de la acomodación y su relación con los cambios en el aporte de sedimentos (Catuneanu *et al.*, 2009, 2010, 2011). Históricamente los primeros resultados obtenidos por esta metodología de análisis se realizaron a partir de datos sísmicos (Mitchum *et al.*, 1977; Jervey, 1988; Christie-Blick, 1991). Básicamente, una sección sedimentaria analizada es dividida por superficies estratigráficas que limitan patrones de apilamiento distintos, definidos según el comportamiento de los reflectores sísmicos. Estos conceptos también aplicados a secciones sedimentarias en afloramientos y a datos de pozos fueron muy utilizados en trabajos de escala exploratoria incrementando las chances de descubrimientos de nuevas reservas de hidrocarburos. La aplicación de esta metodología también puede ser realizada en escalas de mayor detalle. De manera distinta al método clásico que identifica variaciones de sistemas depositacionales, el análisis de alta resolución se realiza a partir de la identificación de las alternancias de los sub-ambientes depositacionales (que juntos constituyen un sistema). Este abordaje tiene la ventaja de aumentar la capacidad de identificar las heterogeneidades de los reservorios y mejorar las simulaciones de flujo usadas en los modelos de desarrollo de un campo.

La Formación Lajas, parte constituyente del Grupo Cuyo (Dellapé *et al.*, 1978), descripta por distintos investigadores (Gulisano e Hinterwimmer, 1986; Zavala, 1993, 1996; McIlroy *et al.*, 2005; Arregui *et al.*, 2010; Gugliotta *et al.*, 2015; Canale *et al.*, 2015) depositada durante el Jurásico medio en la cuenca Neuquina, está integrada por sedimentos depositados en sistemas fluvio-deltaicos y marinos someros; presenta características muy adecuadas para la aplicación de métodos de análisis estratigráficos de alta resolución.

En un área de 80 km² ubicada en el anticlinal de Picún Leufú (Suroeste de la cuenca Neuquina), a unos 30 km al sur de la ciudad de Zapala, fueron relevados 19 perfiles de campo en escala de detalle (1:100). A partir de los 17 tipos de facies descriptas fueron agrupadas 12 asociaciones de facies asignables a subambientes depositacionales (sistemas deltaico y marino somero). También se obtuvieron mediciones de paleocorrientes y datos estratigráficos (identificación/extensión de las superficies estratigráficas, geometrías de los cuerpos de arena, etc) clasificados como de alta, media y baja frecuencia constituyéndose en los elementos principales utilizados en la elaboración de los modelados 3D de facies.

UBICACIÓN Y ANTECEDENTES

El área de trabajo está ubicada en el anticlinal de Picún Leufú, próximo al arroyo del mismo nombre, rasgo estructural que constituye parte de la denominada Dorsal de Huincul (desarrollada en el sur de la cuenca Neuquina). El núcleo del referido anticlinal se ubica aproximadamente a unos 30 km al sur de la ciudad de Zapala, Provincia de Neuquén (Fig. 1).

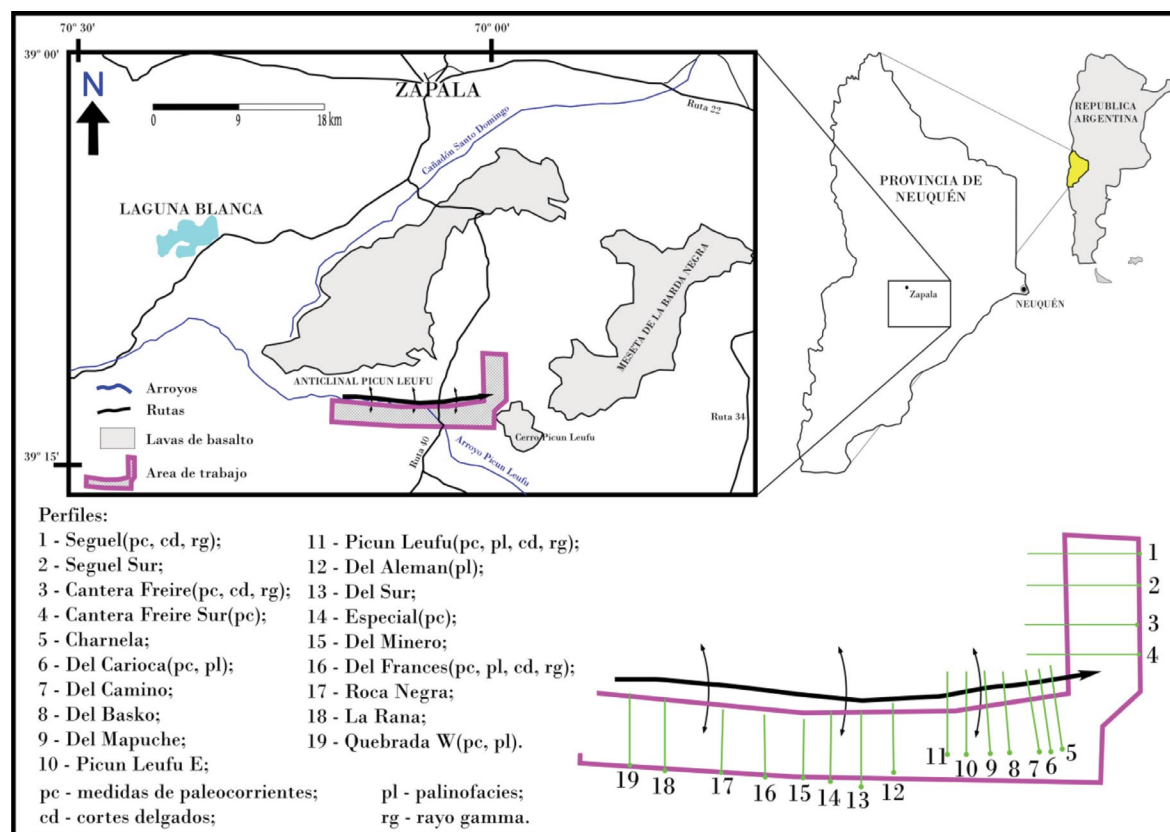


Figura 1. Ubicación del anticlinal de "Picún Leufú". Abajo a la derecha, diseño del eje de orientación E/W con la ubicación de las trazas de los perfiles litológicos de campo. Junto al nombre de cada perfil (abajo a la izquierda) se identifican aquellos en los que se realizaron las mediciones de paleocorrientes, el muestreo para cortes delgados y análisis de palinofacies, así como el registro del perfil de rayo gamma.

El flanco Norte presenta suave buzamiento ($<5^\circ$) hacia el N-NE y fue estudiado a partir de 4 perfiles de campo (Seguel, Seguel Sur, Cantera Freire y Cantera Freire Sur). La sección aflorante en el flanco Sur posee buzamientos entre 50° a 65° hacia el S-SW y fue descripta por 15 perfiles de campo (La Charnela, Del Carioca, Del Camino, Del Basko, Del Mapuche, Picún Leufú E, Picún Leufú, Del Alemán, Del Sur, Especial, Del Minero, Del Francés, La Rana y Quebrada W). Los perfiles están distribuidos a distancias promedio de 1 km lo que garantiza la generación de un modelo geológico de detalle.

La Formación Lajas ya fue objeto de estudio de distintos investigadores. Zavala (1993)

desarrolló su tesis doctoral en distintas localidades al sur de la cuenca Neuquina, caracterizando en un área de 2800 km² los principales aspectos sedimentológicos y estratigráficos de la referida formación y de aquellas otras que se ubican por arriba (Fm. Challacó) y por debajo (Fm. Los Molles). Con anterioridad, Gulisano y Hinterwimmer (1986) ya habían realizado un trabajo de detalle sobre la sección aflorante del pasaje de la Fm. Los Molles hacia la Fm. Lajas en parte del flanco norte del anticlinal de Picún Leufú.

El presente trabajo fue realizado sobre un área de 80 km². Presenta una sección vertical aflorante común con el trabajo de Zavala (op cit.) en el perfil Picún Leufú y con Gulisano e Hinterwimmer (1986) en todo el flanco norte (perfiles Puesto Seguel, Puesto Seguel Sur, Cantera Freire y Cantera Freire Sur).

En términos generales los dos trabajos citados interpretaron para la Fm. Lajas un sistema depositacional deltaico con dominio - o influencia - fluvial y mareal, variables y alternadas. El trabajo de Gulisano e Hinterwimmer (op. cit.) a pesar de su distribución geográfica restringida, ofreció una descripción muy detallada de las facies y asociaciones de facies (denominada por los autores “secuencia vertical de facies”). En una escarpa de 5 km de largo los colegas citados relevaron 5 perfiles verticales de campo separados entre si 1 km, en escala 1:100. En este trabajo el pasaje de las facies predominantemente pelíticas de la Fm. Los Molles hacia los depósitos heterolíticos/arenosos con nítido carácter progradacional de la Fm. Lajas fue muy bien identificado.

Zavala (op. cit) realizó 12 perfiles litológicos de campo. A partir de sus análisis sedimentológicos y estratigráficos identificó la existencia de 4 secuencias de 3° orden (según clasificación del autor) que se desarrollaron desde el Toarciano superior al Bathoniano superior (Fig. 2). La secuencia basal (denominada JC4) fue dividida en 5 secuencias depositacionales de orden inferior (4° orden). Zavala (1996) interpreta en su carta estratigráfica que las secuencias superiores que dividen la JC4 (JC4-3, 4 y 5) no se presentan en el área del anticlinal de Picún Leufú pues fueron erosionadas por la discordancia intrabajociana (que divide la Fm. Lajas en dos tramos). A estar con el mismo autor, sobre esta discordancia se desarrolló la secuencia JC5, constituida en la parte este del flanco Sur por depósitos fluviales de relleno de valles incisos. Mientras la secuencia más basal de 4° orden de la JC4 – presente en el núcleo del anticlinal - corresponde a los depósitos de pelitas de la Fm. Los Molles, las secuencias JC6 y JC7 representan los depósitos más continentales del área, asignables al pasaje de la Fm. Lajas hacia la Fm. Challacó, según Zavala (1993; 1996).

En el extremo occidental del anticlinal de Picún Leufú (Bajo los Molles – 5 a 10 km a W del área del presente trabajo), McIlroy *et al.* (2005) desarrollaron los aspectos sedimentológicos de la sección aflorante de la Fm. Lajas e interpretaron que serían el resultado del desarrollo de sucesiones completas de llanuras de mareas. Gugliotta *et al.* (2015) presentaron una interpretación alternativa para un tramo de esta misma sección asignándola a subdeltas de crevasse, cuya mayor o menor influencia mareal es resultado de variaciones estacionales. Arregui *et al.* (2016) describen la existencia de intervalos con Inclined Heterolitic Stratifications (IHS) de origen mareal en esta misma sección.

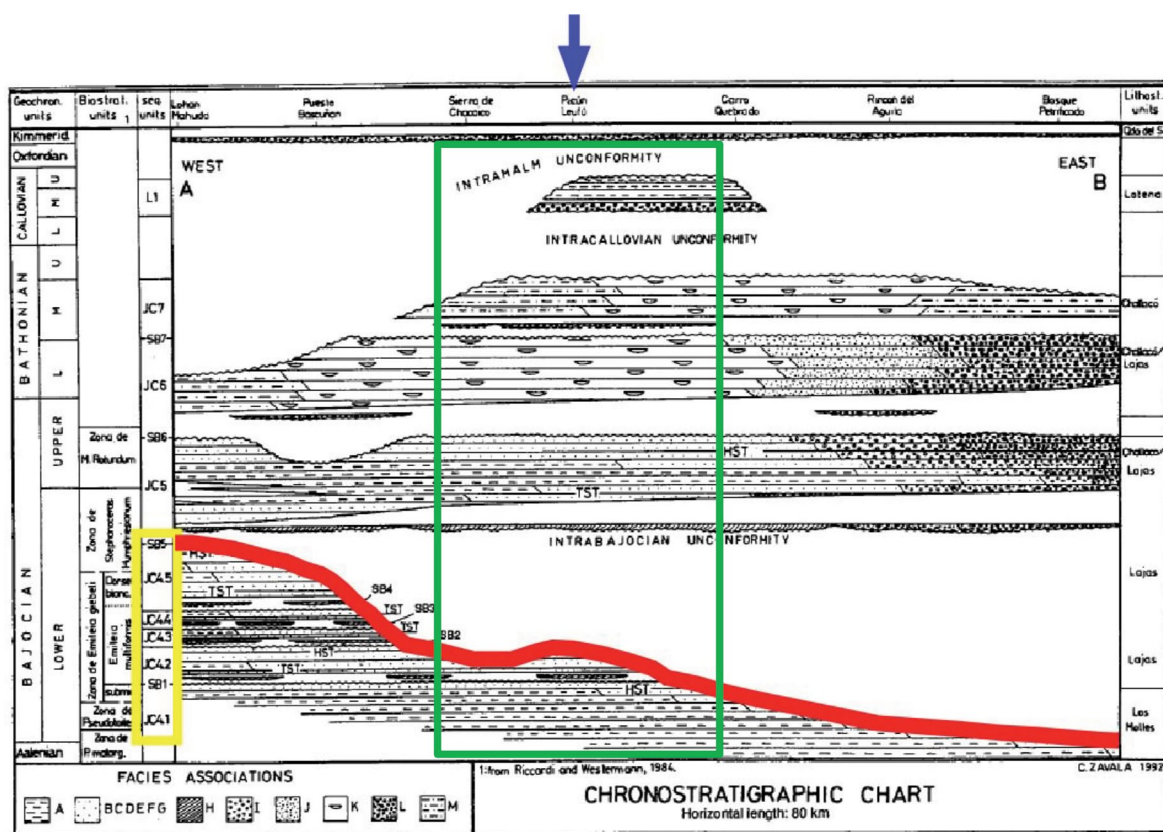


Figura 2. Carta cronoestratigráfica modificada de Zavala (1996), ubicando (flecha azul) el perfil Picún Leufú de este autor coincidente con la ubicación del perfil del presente trabajo; se muestran las secuencias de 4° orden y la discordancia intrabajociana (línea roja) que divide la Fm. Lajas en dos tramos. La parte destacada en verde de la sección corresponde a un corte E/W aproximado del anticlinal.

En otros sitios la Fm. Lajas también ha sido estudiada por diversos investigadores. Canale *et al.* (2015) estudiaron las secciones aflorantes al norte de la ciudad de Zapala en las áreas de Portada Covunco y Sierra de la Vaca Muerta (50 a 60 km al norte del presente trabajo), interpretando un modelo depositacional formado por ambientes deltaicos fluvio-dominados que cíclicamente fueron afectados por descargas hiperpícnicas. Veiga *et al.* (2013) estudiaron el Grupo Cuyo aflorante en la Sierra de Reyes (150 Km al norte del área estudiada). La Fm. Lajas según estos investigadores se ha depositado durante el Bathoniano tardío y el Caloviano temprano, mucho tiempo después de la sección aflorante descrita en el anticlinal de Picún Leufú. La Fm. Lajas presentaría una sección constituida por depósitos marinos dominados por tempestades y olas en su base y por un tramo superior asignable a un ambiente fluvio-deltaico.

Un análisis estratigráfico de alta resolución de la porción más occidental del anticlinal Picún Leufú fue presentado por Arregui *et al.* (2010). Estos autores identificaron las secuencias de 4° orden de Zavala (1993; 1996) y otras de mayor frecuencia y menor distribución geográfica. Este trabajo extendió y alteró la identificación de algunas de estas secuencias a un área más extensa.

METODOLOGÍA

Se presenta parte de los resultados obtenidos con la tesis doctoral de Silveira (en ejecución), desarrollada en la sección aflorante de la Fm. Lajas ubicada en el anticlinal de Picún Leufú. En términos generales las actividades realizadas pueden ser divididas en: a) recopilación de la información precedente; b) tareas de campo; c) tareas de laboratorio; d) tareas de gabinete.

A partir de la recopilación de los antecedentes fueron establecidas las bases para plantear la hipótesis inicial de investigación. Basado en esto se entendió que para este trabajo, el análisis estratigráfico secuencial de alta resolución era la mejor metodología de trabajo para la comprensión de la distribución espacial de las rocas reservorio y por ende de la confección de modelados 3D de facies. Para el presente trabajo fueron usados como referencia los conceptos de la estratigrafía secuencial, a partir de la comprensión de la relación entre la variación de la acomodación (eustasia+tectónica – Jervy, 1988) y los cambios de aporte de sedimentos (Miall, 2010; Catuneanu *et al.*, 2009; 2010; 2011). Las secciones descriptas en cada uno de los 19 perfiles de campo fueron estudiadas según la lógica de la identificación de los cambios de patrón de apilamiento, en distintos órdenes. Por ende, estos cambios indican la posición de las superficies estratigráficas de mayor importancia pues los cortejos de sistema son separados por las mismas.

En síntesis, las tareas de campo contaron con el relevamiento de perfiles litológicos verticales en escala de detalle (1:100), el mapeo lateral de superficies estratigráficas y mediciones de paleocorrientes. El mapeo lateral de las superficies estratigráficas contó con el apoyo de fotografías aéreas de gran detalle relevadas para la tesis doctoral.

Las tareas de laboratorio están relacionadas a los análisis petrográficos y de palinofacies de las muestras de rocas recolectadas en campo y del contenido de microfósiles encontrados en los cuerpos de arena y también en las pelitas localizadas entre paquetes de arenas. Estos resultados no serán discutidos en este trabajo.

Además de la identificación de las superficies principales en las fotografías aéreas (antes de las campañas de campo), las tareas de gabinete estuvieron relacionadas con la preparación en medios digitales de los datos de los perfiles litológicos. También en el gabinete fueron realizadas correlaciones entre los perfiles mediante el análisis estratigráfico secuencial. Por último, las actividades realizadas en la oficina están relacionadas con la preparación de los modelados 3D de facies de la sección investigada.

De todas las tareas realizadas durante este proyecto, la metodología de análisis estratigráfico secuencial de alta resolución debe ser especialmente comentada pues le corresponde un rol de mayor importancia para la definición y el desarrollo de un reservorio. Las actividades de descripción litológica e interpretación de facies, así como su agrupamiento e identificación de patrones verticales de apilamiento, corresponden a los estudios tradicionales y básicos de cualquier análisis estratigráfico. La identificación de las superficies estratigráficas (que limitan patrones de apilamiento distintos) y la

interpretación paleoambiental de las secciones intermedias son la base fundamental para establecer las correlaciones laterales entre pozos y perfiles de campo. A partir de la identificación, descripción y medición de las extensiones laterales de las superficies estratigráficas, de la evaluación de los contrastes verticales de ambientes o de subambientes a ellas relacionados y de la individualización de hiatus de distinta relevancia es posible definir los órdenes jerárquicos de las mismas. Además de la jerarquización de las secuencias estratigráficas, la definición, en cortes *dip* y *strike*, del número de secuencias de alta frecuencia que conforman una secuencia de media frecuencia, o sea, de orden superior, representan la contribución más importante en el mapeo lateral de las secuencias sedimentarias. A estos datos se suman la determinación de los cambios laterales en las proporciones relativas de las asociaciones de facies, así como las paleocorrientes que serán simuladas en la confección del modelado geológico 3D.

INTERPRETACIÓN PALEOAMBIENTAL

Fueron identificadas 17 facies sedimentarias correspondiendo a la división genética más elemental de las rocas. A cada una de estas se asocian características hidrodinámicas específicas. Buscando interpretar mejor las condiciones ambientales responsables por el desarrollo de las secciones sedimentarias de la Fm. Lajas, las facies fueron agrupadas en 12 asociaciones de facies con significado paleoambiental.

En un breve relato se puede mencionar que las facies corresponden a 3 grandes grupos de litofacies: pelitas/heterolitos, psamitas y psefitas. Las estructuras sedimentarias presentadas son esencialmente resultado de flujos subácueos unidireccionales o del retrabajo por flujo oscilatorio, mientras los heterolitos corresponden a la alternancia de flujos unidireccionales subácueos de bajo régimen con procesos de decantación. Las psefitas observados son resultado de flujos unidireccionales subácueos de alto régimen.

Las 12 asociaciones de facies fueron agrupadas según la relación genética de las facies. A cada una de las asociaciones fue asignado un sub-ambiente depositacional. En los perfiles de campo fueron definidas las naturalezas del pasaje vertical ascendente de las asociaciones de facies, muy comúnmente graduales desde condiciones ambientales distales hacia más proximales de la línea de costa. Los sub-ambientes interpretados son asignables a depósitos de: *offshore*, *offshore transition*, *shoreface* inferior, prodelta, frente deltaico distal, frente deltaico proximal, canal distributivo terminal, canales de planicie deltaica, bahía/planicie interdistributaria, canales de planicie fluvio-deltaica, canales fluviales y planicie de inundación fluvial.

La reconstrucción paleoambiental de la sección estudiada fue fundamentada en: a) la génesis de las asociaciones de facies y su distribución espacial; b) los patrones verticales de apilamiento; c) las proporciones verticales relativas de las asociaciones de facies para cada perfil de campo; y d) la distribución paleogeográfica de las asociaciones de facies (basada en las proporciones y en las medidas de las paleocorrientes).

De todos los perfiles relevados, el nombrado Seguel, ubicado en la misma localidad del perfil Puesto Seguel, de Gulisano e Hinterwimmer (1986), es el más representativo del pasaje progradacional de los depósitos distales de prodelta hacia aquellos formados en la planicie deltaica (Fig. 3). Este patrón de apilamiento, también identificado en perfiles de rayo gamma espectral, representa la evolución temporal de los sub-ambientes vecinos de un sistema deltaico, según la ley de Walther (Miall, 2010). Los depósitos de la Fm. Lajas estudiados en el anticlinal de Picún Leufú fueron para el presente trabajo, interpretados como formados en un sistema deposicional marino somero, principalmente deltaico, con fuerte influencia fluvial y retrabajo subordinado por olas y mareas.

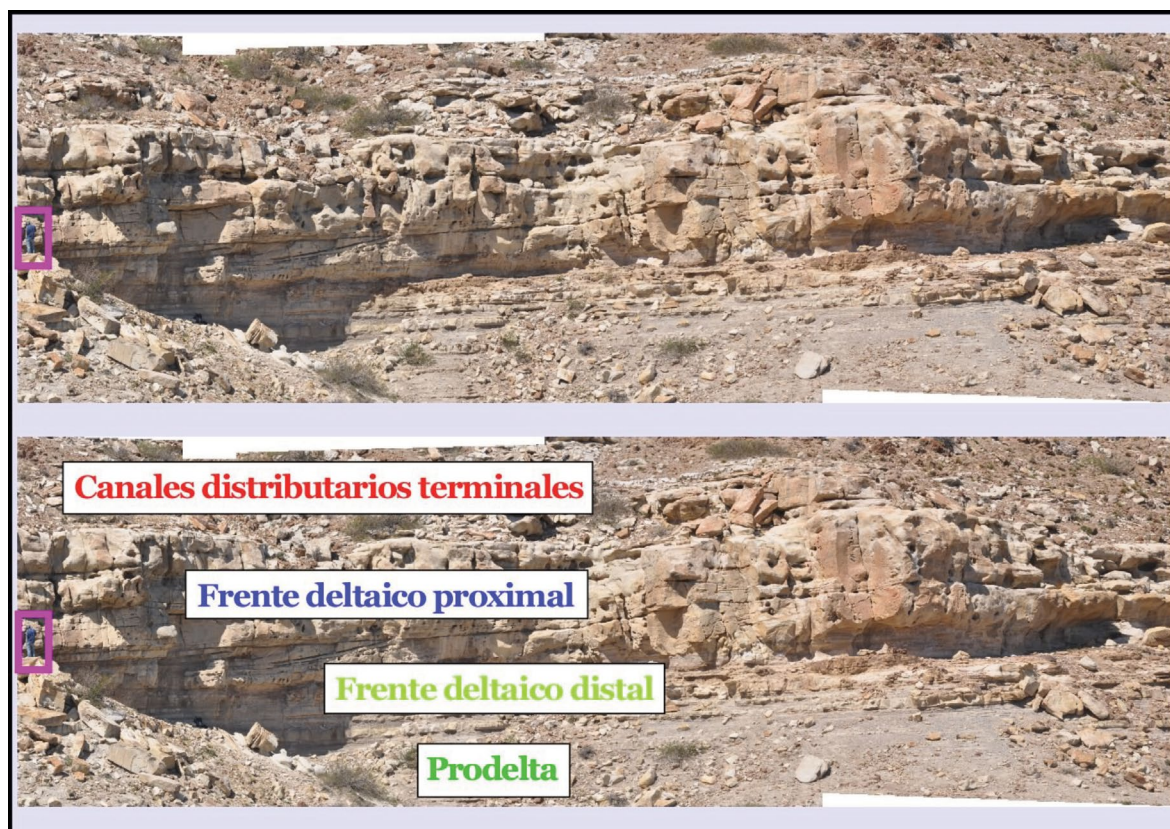


Figura 3. Sección aflorante en corte transversal a la línea de costa (DIP) en la ubicación del perfil Puesto Seguel. El patrón progradacional es claro y fue identificado por distintos investigadores. Escala: persona de pie en un recuadro a la izquierda de la imagen.

INTERPRETACIÓN ESTRATIGRÁFICA SECUENCIAL DE ALTA RESOLUCIÓN

Para un análisis estratigráfico es fundamental que se adopte un marco estratigráfico confiable y de carácter regional (3° orden). En el área de trabajo, más específicamente en el perfil Picún Leufú, Zavala (1993) identificó la posición estratigráfica de la discordancia intrabajociana que divide la Fm. Lajas en dos tramos. En el presente trabajo esta superficie fue lateralmente mapeada por distancias del orden de 3-4 km. Sin embargo, aun así, no representa un datum de referencia lo

más adecuado por su comportamiento diácrono, su génesis asociada a cambios paleogeográficos trascendentes le entregan un carácter confiable para realizar un análisis ambiental en mediana y gran escala, lo que permitirá la ubicación de amplios intervalos estratigráficos, autorizando así las correlaciones de media frecuencia.

A partir de los datos de las 953 medidas de paleocorrientes y de la distribución geográfica de las proporciones relativas de facies se determinó – además de la continentalización generalizada del tramo superior en relación al tramo inferior de la Fm. Lajas, en el área del anticlinal de Picún Leufú - una diferencia en la distribución y orientación general de los sub-ambientes que componen el sistema depositacional deltaico (Fig. 4). Básicamente los depósitos del tramo inferior se desarrollaron hacia la dirección NW, predominando los sub-ambientes marino someros (offshore transition, shoreface inferior, prodelta, frentes deltaicos distal y proximal). El tramo superior representa el mayor avance del edificio deltaico con orientación hacia N/NW, sin la presencia de depósitos de shoreface y la predominancia de los sub-ambientes más proximales (canales de planicie deltaica y distributarios terminales). Geográficamente, los depósitos deltaicos del tramo inferior están concentrados en la porción oriental del área de estudio mientras los sub-ambientes de shoreface inferior y offshore transition se ubican en la zona occidental, resultado de la redistribución lateral de los primeros.

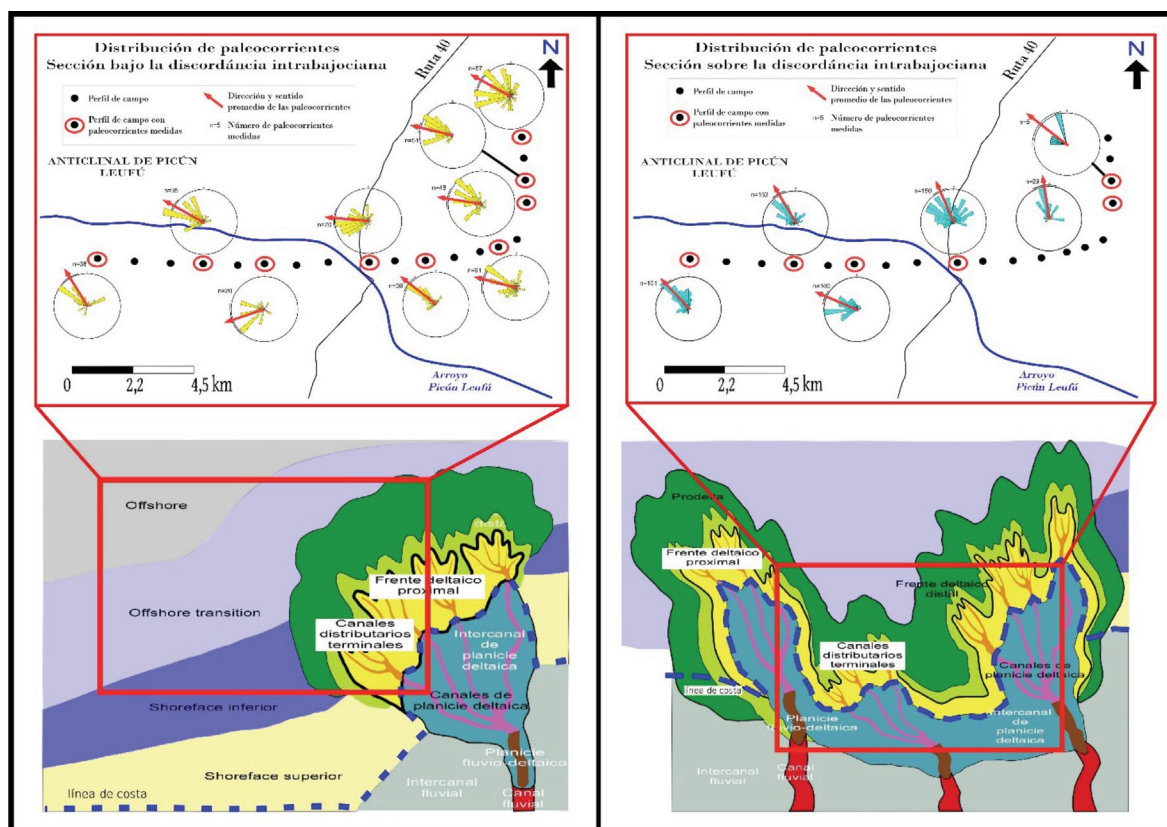


Figura 4. Distribución de paleocorrientes en las secciones inferior (izquierda) y superior (derecha) de la Fm. Lajas, separadas por la discordancia intrabajociana y el modelo conceptual de distribución de los sub-ambientes deltaico y marino somero interpretado. El área de estudio está ubicada en los modelos conceptuales adentro de los cuadros de color rojo.

Inicialmente es fundamental aclarar que todo análisis estratigráfico para ser realizado necesita de algunos elementos básicos: a) sección sedimentaria de estudio; b) superficies estratigráficas que representen marcos de correlación o marcos estratigráficos de otra naturaleza (ej. un depósito de tobas volcánicas, un datum bioestratigráfico, etc); c) relación vertical y lateral de los distintos tipos de facies/asociaciones de facies que constituyan un tramo de una sección sedimentaria definida entre dos marcos estratigráficos de referencia.

La palabra resolución en ciencia hace referencia al grado de detalle alcanzado por un determinado tipo de metodología científica para definir o separar un fenómeno u objeto de estudio. Aplicado a la estratigrafía secuencial, esta terminología es usada para indicar el grado de detalle alcanzado para, a partir de datos de una sección aflorante, testigos corona o perfiles eléctricos de pozos, separar, describir e interpretar distintos paquetes de roca adyacentes, con control cronológico relativo en base a las superficies mapeables, o sea, para separar secuencias estratigráficas de distintos órdenes jerárquicos. Considerando que las clásicas secuencias dichas de 3° orden fueron definidas en escala sísmica (baja resolución), correspondiendo a las dimensiones de los sistemas depositacionales, se puede decir que todos los análisis realizados internamente a esta escala serían de media o de alta resolución. O sea, los cambios de patrón de apilamiento internos (alternancias de patrones progradacionales y retrogradacionales), en diversos órdenes, observados en una sección correspondiente a un único sistema depositacional, serían asignables a alternancias de cortejos regresivo-transgresivo (T-R; Embry, 1993) y corresponden a secuencias de media y alta resolución (tema ampliamente discutido por Catuneanu y Zecchin (2013).

Para la sección estudiada en el presente trabajo fueron observados patrones de apilamiento de distintas escalas. Los cambios más elementales corresponden a las alternancias de asociaciones de facies formadas entre sub-ambientes que ocurren adyacentes en el espacio geográfico. En síntesis, fueron identificadas 4 tipos de alternancias de alta frecuencia (ciclos): offshore transition-shoreface inferior; prodelta-frente deltaico distal; frente deltaico distal-frente deltaico proximal; frente deltaico proximal-intercanal de planicie deltaica/canales de planicie y distributarios terminales.

Los patrones de apilamiento de media frecuencia corresponden a sucesiones que tienen como end-members sub-ambientes que, a depender del grado de avance de la línea de costa y de la orientación de las paleocorrientes, pueden estar más o menos alejados geográficamente, pasando internamente por sub-ambientes intermedios (ej. prodelta-canal de planicie deltaica, pasando por frente deltaica distal y proximal – Fig. 5). Por representar cambios de mayor trascendencia, suelen poseer mayores espesores y extensión geográfica e involucran una serie de secuencias elementales, de alta frecuencia, que se organizan con una determinada tendencia en relación a los sub-ambientes end-members de estos cortejos de media frecuencia. Cuando el patrón de apilamiento es progradacional, se presenta más espeso, mientras su límite está representado por un cambio neto de asociaciones de facies más distales (ej. prodelta) sobre otras mucho más proximales (ej. canales distributarios), su límite inferior es marcado por un cambio más gradual (ej. prodelta).

Cuando es retrogradacional, más delgado, la naturaleza de los límites suele ser el inverso, o sea, la diferencia de espesor entre los dos cortejos evidencia que el proceso de somerización es gradual, mientras lo de ahogamiento es rápido. Estos patrones retrogradacional y progradacional juntos componen la periodicidad identificada por Zavala (1993) como de 4° orden.

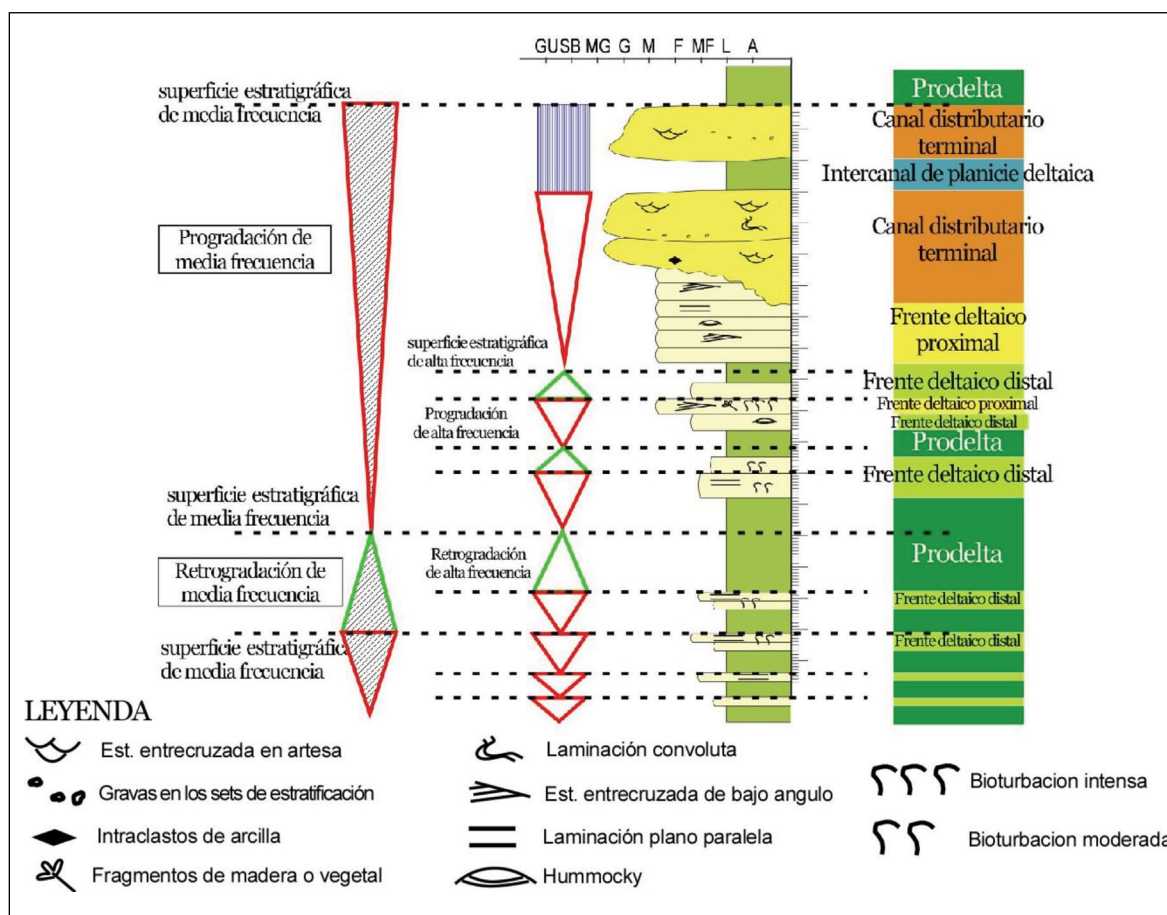


Figura 5. Secuencias de alta y media frecuencias identificados en los perfiles de campo. El patrón progradacional es predominante.

Identificados los patrones de apilamiento y sus rupturas, es posible definir las superficies estratigráficas de distintos órdenes de frecuencia y naturaleza genética. Entre los perfiles de campo, alejados en promedio 1 km, fueron mapeadas lateralmente en campo, con el apoyo de las fotografías aéreas, las superficies de media frecuencia. Las superficies que limitan secuencias de alta frecuencia no son mapeables por distancias superiores a los 300 metros. Para el mapeo lateral de alta resolución fueron relevados perfiles de mucho detalle, distanciados 200 metros, en el corte DIP en las cercanías del perfil Seguel.

Las superficies estratigráficas más fácilmente identificables (de alta y media frecuencias) en estos depósitos deltaicos corresponden a aquellas que representan la máxima regresión, o sea, el fin de un patrón progradacional. Las superficies de inundación máxima son más difíciles de

identificarse pues los patrones retrogradacionales son muy poco desarrollados y este pasaje muchas veces es muy rápido y por ende están muy cercanas a las de máxima regresión.

El mapeo lateral de las secuencias de media frecuencia, cuya referencia son las superficies estratigráficas de este orden jerárquico, corresponde al marco principal para la confección del modelado 3D de las asociaciones de facies. A pesar de que las secuencias de alta frecuencia no pudieron ser mapeadas por largas distancias, su naturaleza predominantemente progradacional (con geometrías *downdip*) debe ser reproducida en los modelos matemáticos (Fig. 6). Esto significa que las extensiones de las superficies estratigráficas (de alta y medias frecuencias) y las variaciones laterales de las proporciones de las asociaciones de facies en cortes *dip* y *strike* mapeados definen los valores de los parámetros adoptados para la confección de los modelados 3D. Sin embargo, el uso de parámetros definidos en afloramientos análogos suele ser muy indicado en los casos en que no se dispongan de valores de la propia sección estudiada. La Fm. Lajas corresponde a la sección equivalente a los depósitos que constituyen los reservorios productores del campo de Río Neuquén, o sea, representan un análogo.

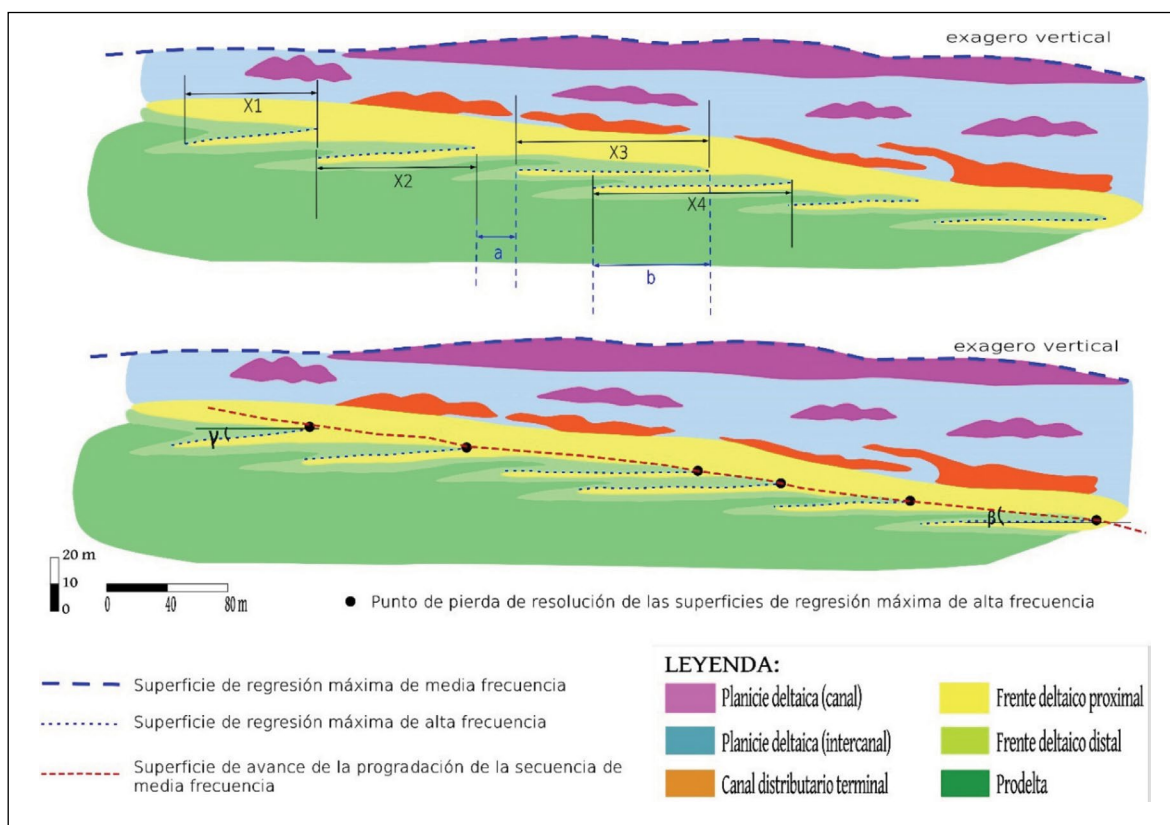


Figura 6. Elementos de alta frecuencia que deben ser considerados en la definición de los parámetros utilizados para la simulación de los modelados 3D de facies para un corte DIP. Las extensiones laterales de las superficies de regresión máxima de alta resolución son indicativas de las dimensiones de las secuencias de este orden jerárquico. Importante considerar que estas superficies pueden ocurrir alejadas horizontalmente (a) o en superposición (b), posiblemente resultado de variaciones en las tasas de aporte sedimentario. El ángulo de avance progradacional (β) y del desarrollo de las secuencias (γ) también son importantes en la definición de la geometría final de una secuencia de media frecuencia.

PREMISAS DEL MODELADO 3D DE FACIES

El uso de la estratigrafía de alta resolución en la elaboración de los modelados 3D de facies corresponde a un camino (una tendencia) que conduce a mejores resultados en la escala de media resolución y no necesariamente el objetivo final (la confección de un modelado de alta resolución). Para la confección de los modelados 3D geológicos fueron elegidas 3 secuencias de media frecuencia (S7, S8, S9 – Fig. 7), cuya definición es solamente posible a partir de la identificación de las tendencias de apilamiento de las secuencias de escalas inferiores (alta resolución). Para comparación de los resultados fueron usados 2 escenarios: (a) baja resolución, una zona reservorio, correspondiendo a la sumatoria de las secuencias S7+S8+S9; (b) media resolución, 3 zonas reservorio, correspondiendo a las secuencias S7, S8 y S9 en separado, utilizando los parámetros obtenidos a partir de las medidas de campo. Por un tema relativo a la dificultad de simular matemáticamente con un único algoritmo geometrías tan distintas como las de los canales distributarios terminales/planicie deltaica y los frentes deltaicos proximal/distal (Fig. 6), se decidió separar las secuencias de media frecuencia en dos tramos, un superior, formado predominantemente por los depósitos de canal e intercanal, y otro inferior, constituido por los depósitos de frente deltaico proximal, distal y de prodelta. Aunque limitados al sector más occidental del área de estudio, los depósitos de shoreface inferior y del offshore transition también fueron simulados.

Establecidas las potenciales zonas reservorio, correspondientes a las secuencias de media frecuencia (S7, S8 y S9 – Fig. 8) o la suma de las tres (para el escenario de baja frecuencia – Fig. 8), fueron confeccionados los mapas de espesor de cada una, así como los mapas de proporción de facies, siempre buscando seguir las orientaciones de las paleocorrientes medidas (Fig. 9).

La estructura del modelado geocelular fue elaborada a partir de la superficie de referencia del tope de la secuencia S9 y de las isócoras presentadas en los mapas de espesor. Este modelado ha respetado la distribución de las celdas según la ocurrencia geográfica de las distintas secuencias, o sea, la secuencia S8 se presenta limitada hacia oeste de acuerdo con la interpretación estratigráfica (Fig. 7). Las celdas del modelado fueron definidas con dimensiones horizontales 20 x 20 metros y espesores de 1,0 m para la baja resolución y de 0,40 m para los modelados de media resolución. La inserción de las asociaciones de facies en las celdas del modelado 3D (scale up) en la ubicación de los pozos se mostró muy satisfactoria, respetando los espesores y variaciones de la estratigrafía (Fig. 8).

Comparando la elaboración de modelados con distinta resolución se entiende que la primera ventaja está en la posibilidad de controlar la distribución de las asociaciones de facies por mapas detallados de su variación lateral (Fig. 9).

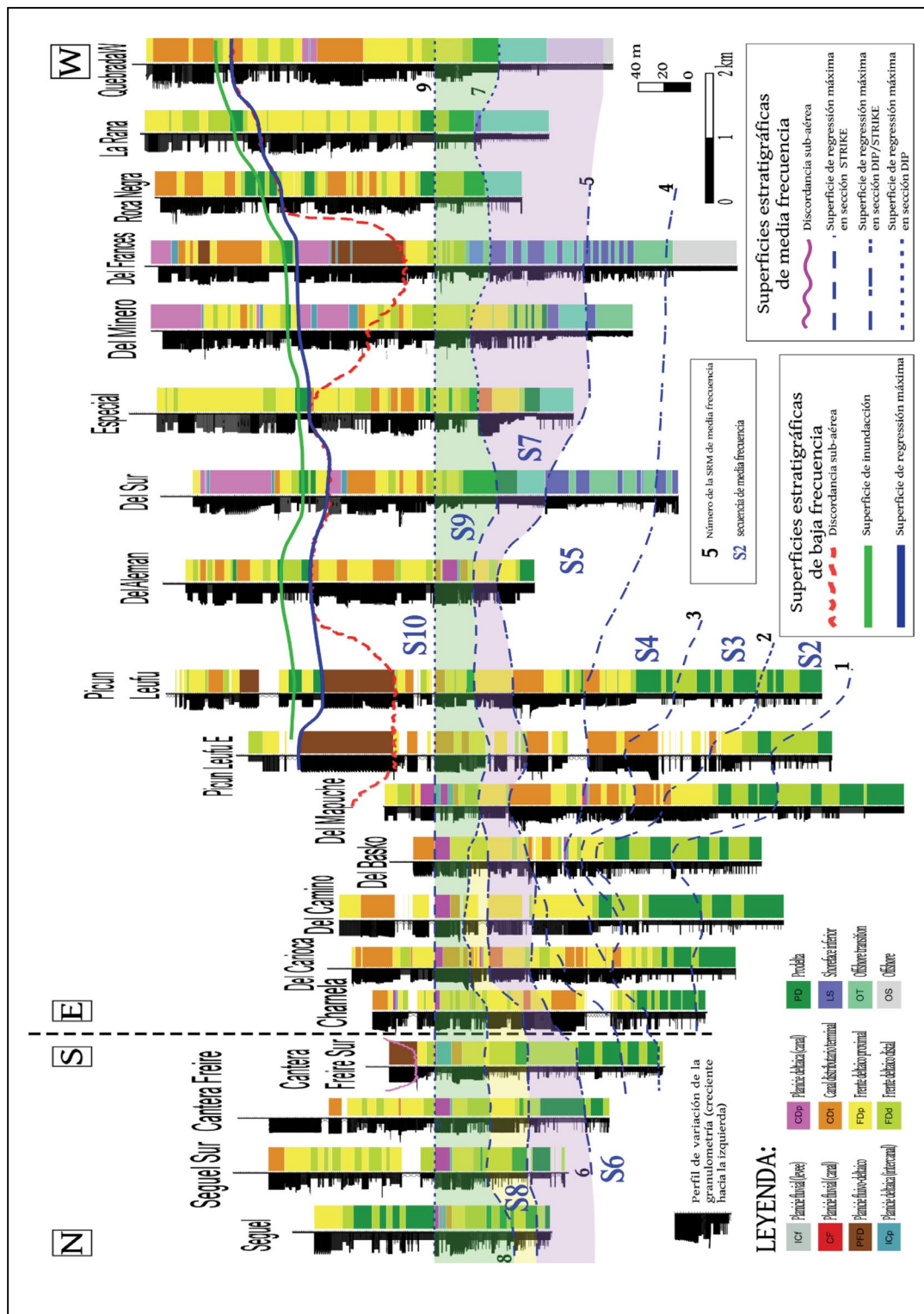


Figura 7. Distribución de las secuencias de media resolución mapeadas y correlacionadas entre los perfiles de campo del área de estudio. Las superficies en color azul que separan las secuencias corresponden a los máximos regresivos. La superficie en color rojo es correspondiente a la discordancia intrabajociana. Las secuencias S7, S8 y S9 están destacadas pues fueron elegidas para la confección de los distintos escenarios de los modelados 3D de facies.

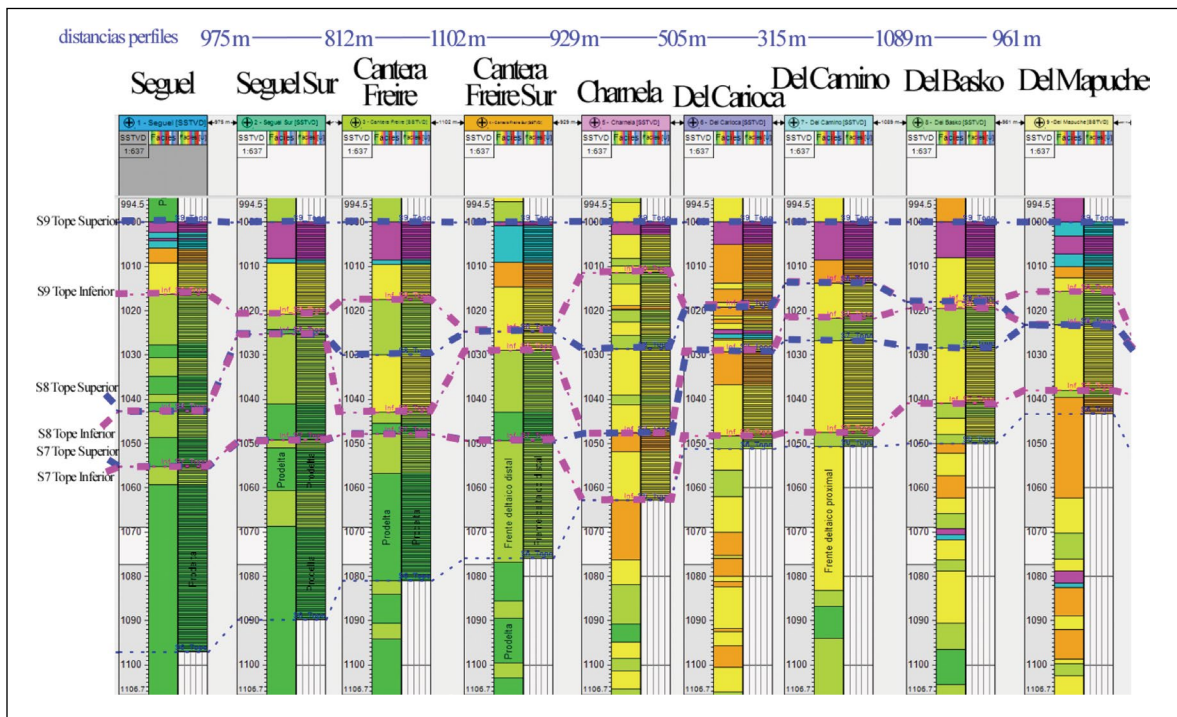


Figura 8. Zonas S9, S8 y S7, superiores e inferiores definidas en el modelado geocelular. La zona única del modelado de baja resolución está limitada en el tope de S9 y en la base de S7. Se observa que las asociaciones de facies fueron correctamente insertadas en las celdas del modelado, cuyos espesores son de 0,40 m. Para una buena representación visual esta figura presenta parte de la correlación, entre los perfiles Seguel y Del Mapuche. La escala vertical está en metros. Para la leyenda de colores de las asociaciones de facies consultar la Fig. 7.

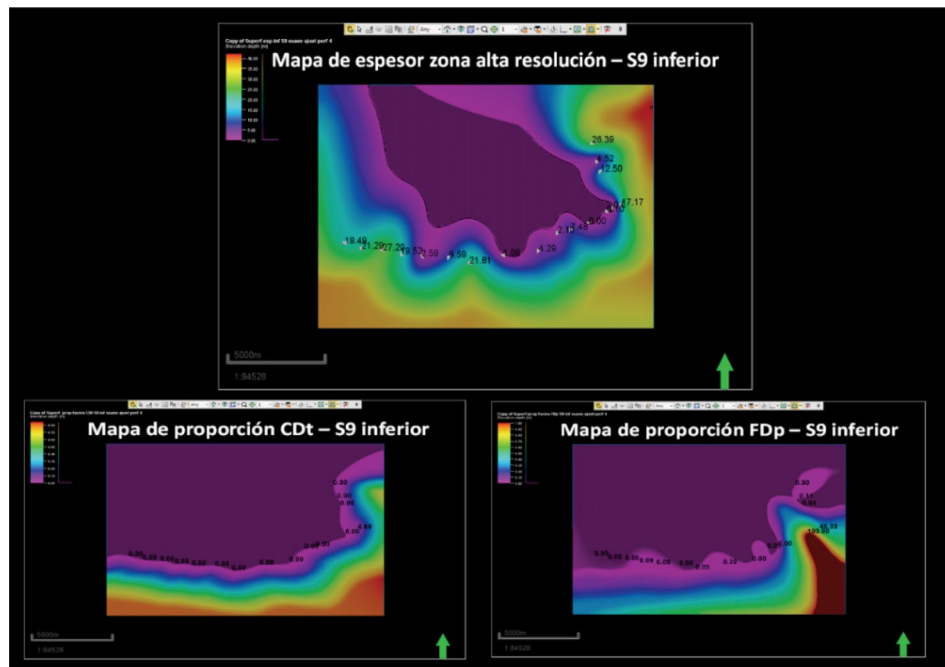


Figura 9. Mapa de distribución de la proporción de los canales distributivos terminales de la zona S9 inferior.

Además de la tendencia establecida por los mapas de distribución, es notable que cuándo se decide separar una sección según su carácter genético y de acuerdo con las geometrías observadas en zonas de media/alta resolución, las variaciones verticales ascendentes de las asociaciones de facies quedan mucho mejor representadas (Fig. 10).

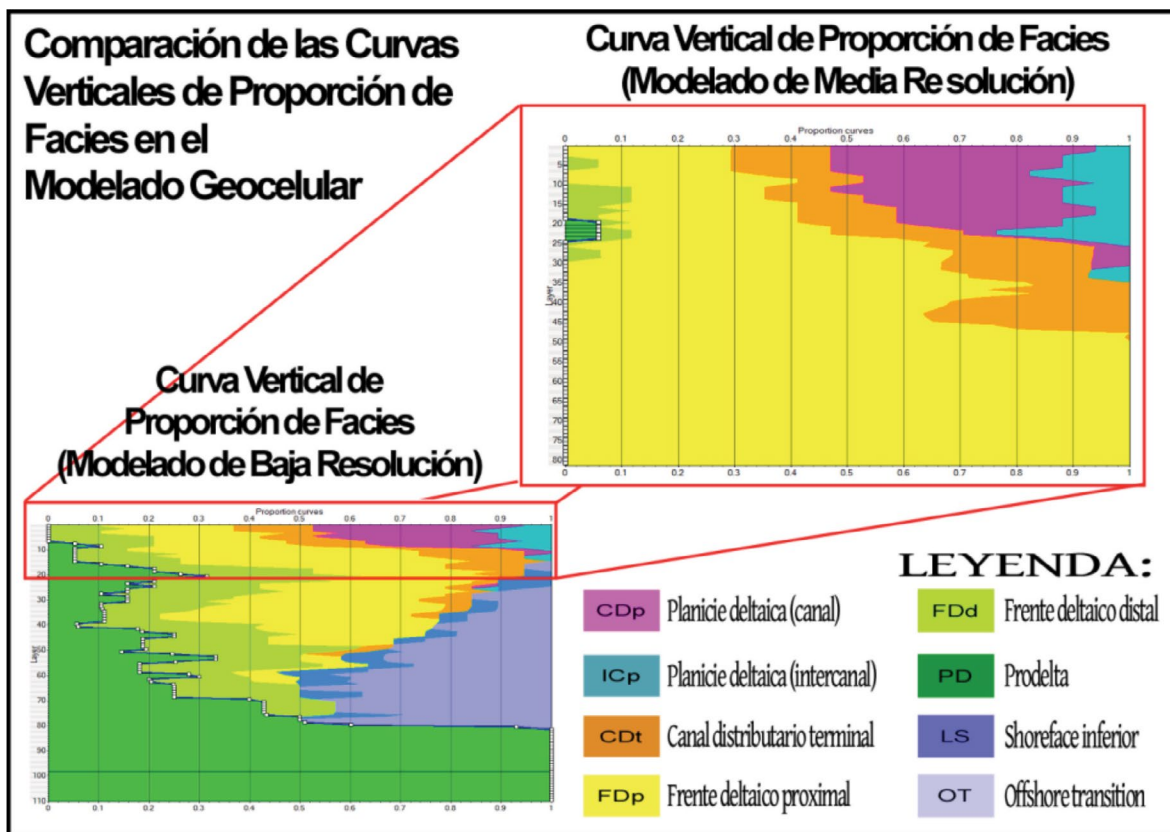


Figura 10. La comparación de las curvas de proporción de facies de los modelados de baja (inferior izquierda) y media (superior derecha) resolución muestra el incremento que se puede alcanzar en el análisis de los datos previos a la simulación de las facies en el modelado geocelular.

RESULTADOS

Las simulaciones de facies fueron realizadas con el algoritmo SIS (Sequential Indicator Simulation) siempre buscando representar las dimensiones medidas en campo de las distintas asociaciones de facies. Para eso, las respectivas superficies estratigráficas fueron la referencia principal, pues representan sus límites visibles y mensurables.

De hecho los primeros resultados indican una mejor capacidad de resolver las geometrías y distribución de facies cuándo son adoptadas las técnicas de estratigrafía secuencial de alta resolución. Los patrones progradacionales predominantes son mejor representados a través de la concentración de las asociaciones proximales en la zona superior (Fig. 11).

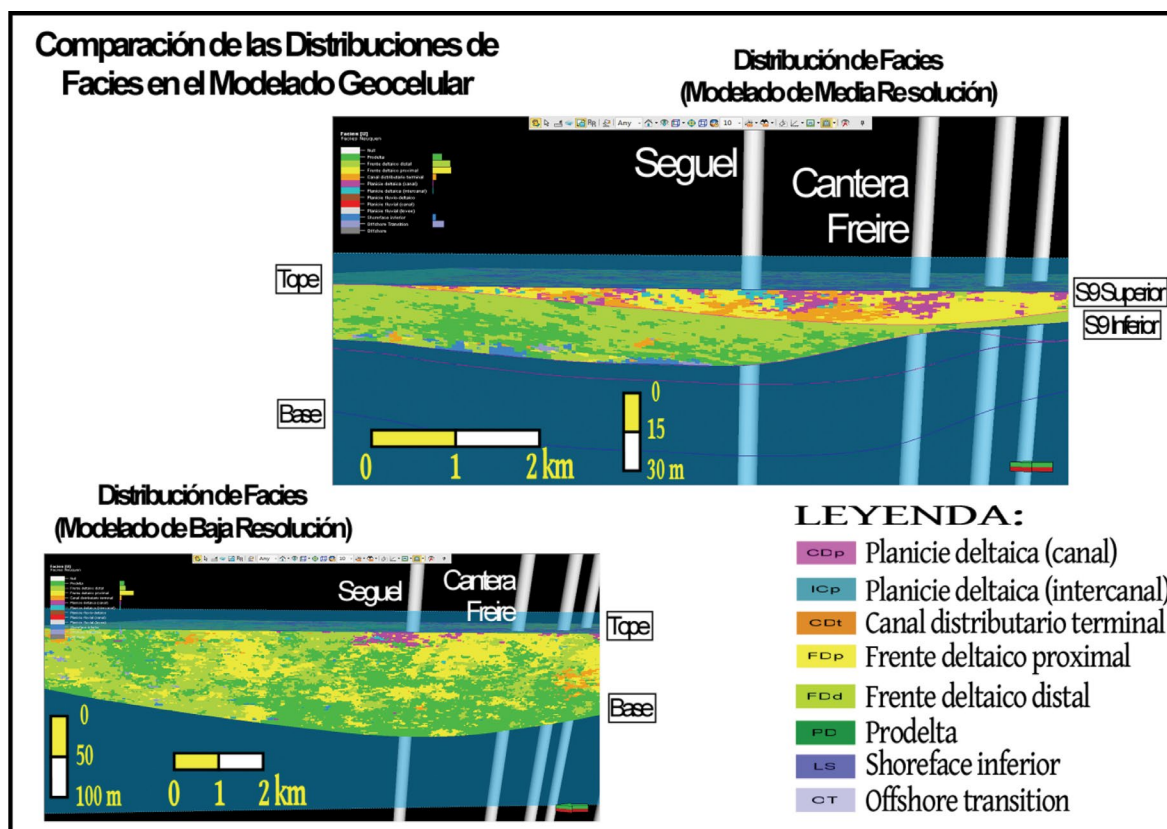


Figura 11. Comparación de los resultados obtenidos para la simulación de facies en corte cerca del perfil Seguel (rumbo N-S) para la zona de baja resolución (inferior izquierda) y S9 superior e inferior (superior derecha). Los perfiles Seguel y Cantera Freire están referenciados. Las zonas S8 y S7 no están representadas, solamente sus límites superiores e inferiores.

CONCLUSIONES

Además de la identificación y mapeo de las secuencias de baja y de media frecuencia (descriptas por Zavala, 1993), fueron definidas las novedosas secuencias de alta frecuencia. Aquellas de media frecuencia indican que el avance del sistema deltaico varió de rumbo desde 250° hasta 350°, mientras las secuencias de alta frecuencia incrementaron la comprensión de la distribución y extensión de las barreras de permeabilidad y potenciales reservorios, respectivamente. Para la mejor representación de estas heterogeneidades fueron creados 2 escenarios distintos: a) modelado de baja resolución; b) modelado con 3 zonas reservorio divididas en 2 sub-zonas cada. El análisis de las variaciones ascendentes de las proporciones relativas de facies fue realizado por zona y muestra una gran relación con el nivel de detalle alcanzado en los mapas de tendencia en los datos de entrada del modelado.

Las simulaciones de facies fueron realizadas con el software Petrel, muy usado en la industria petrolera. Los resultados indican que dependiendo del grado de resolución usado en la definición

del marco estratigráfico, sea basado en secuencias de baja, media o alta frecuencia, la distribución de las asociaciones de facies cambia mucho y por ende las simulaciones de flujo. A partir de lo expuesto se entiende que el incremento de resolución garantiza mejor producción de hidrocarburos, especialmente para los reservorios de las unidades clásticas que integran el Grupo Cuyo (Fm. Punta Rosada-Lajas) ya sean convencionales o de baja permeabilidad.

REFERENCIAS CITADAS

- Arregui, C., G. P. R. Gabaglia, E. B. Rodrigues, y A. J. C. Magalhães. 2010. High frequency cycles in tectonically modified areas. Lower to Middle Jurassic river and tide dominated deltaic systems, Neuquén basin, Argentina. Mendoza, Argentina.
- Arregui C.D., G. P. Raja Gabaglia, D.G.C. Fragoso y M.M.L. Silveira. 2016. Reconocimiento de IHS (Inclined Heterolitic Stratification) en afloramientos de la Fm. Lajas (Jurásico Medio) en el sur de la Cuenca Neuquina y su importancia en el ordenamiento estratigráfico de alta frecuencia. VII CLS, XV RAS, Santa Rosa, La Pampa, Argentina.
- Canale, N., J. J. Ponce, N. B. Carmona, D. I. Drittanti, D. E. Olivera, M. A. Martínez y C. N. Bournod. 2015. Sedimentología e Icnología de deltas fluvio-dominados afectados por descargas hiperpícnicas de la Formación Lajas (Jurásico Medio), Cuenca Neuquina, Argentina. *Andean Geology* 42 (1).
- Catuneanu, O., V. Abreu, J.P. Bhattacharya, M.D. Blum, R.W. Dalrymple, P.G. Eriksson, C.R. Fielding, *et al.* 2009. Towards the Standardization of Sequence Stratigraphy. *Earth-Science Reviews* 92 (1-2): 1-33.
- Catuneanu, O., J. P. Bhattacharya, M.D. Blum, R.W. Dalrymple, P.G. Eriksson, C. R. Fielding, W.L. Fisher, *et al.* 2010. Sequence stratigraphy: common ground after three decades of development. *First Break*, 2010, 28 edición.
- Catuneanu, O., W. E. Galloway, C. G. St. C. Kendall, A. D. Miall, H. W. Posamentier, A. Strasser, y M. E. Tucker. 2011. Sequence Stratigraphy: Methodology and Nomenclature. *Newsletters on Stratigraphy* 44 (3): 173-245.
- Catuneanu, O. y M. Zecchin. 2013. High-Resolution Sequence Stratigraphy of Clastic Shelves II: Controls on Sequence Development. *Marine and Petroleum Geology* 39 (1): 26-38.
- Christie-Blick, N. 1991. Onlap, offlap, and the origin of unconformity-bounded depositional sequences. *Marine Geology* 97: 35-56.
- Dellapé, D. A., G. A. Pando, M. A. Uliana, y E. A. Musacchio. 1978. Foraminíferos y ostrácodos del Jurásico en las inmediaciones del arroyo Picún Leufú y la ruta 40 (Provincia del Neuquén, Argentina) con algunas consideraciones sobre la estratigrafía de la Formación Lotena. *Actas* 2:489-507. Buenos Aires.
- Embry, A. F. 1993. Transgressive-regressive (TR) sequence analysis of the Jurassic succession of the Sverdrup Basin, Canadian Arctic Archipelago. *Canadian Journal of Earth Sciences* 30: 301-20.
- Gugliotta, M., S. S. Flint, D. M. Hodgson, y G. D. Veiga. 2015. Stratigraphic Record of River-Dominated Crevasse Subdeltas With Tidal Influence (Lajas Formation, Argentina). *Journal of Sedimentary Research* 85 (3): 265-84.

- Gulisano, C.A., y Hinterwimmer, G. 1986. Facies delataicas del jurásico medio en el oeste del Neuquén. Boletín de Informaciones Petroleras, 1986, 8 edición.
- Jervey, M. T. 1988. Quantitative geological modeling of siliciclastic rock sequences and their seismic expression. Sea Level Changes - An Integrated Approach, editado por C. K. Wilgus, B. S. Hastings, C. G. St. C. Kendall, H. W. Posamentier, C. A. Ross, y J. C. Van Wagoner, 42:47-69. SEPM special publication. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists.
- McIlroy, D., S. Flint, J. A. Howell, y N. Timms. 2005. Sedimentology of the tide-dominated Jurassic Lajas Formation, Neuquén Basin, Argentina. The Neuquén Basin, Argentina: a case study in sequence stratigraphy and basin dynamics, editado por G. D. Veiga, 83-107. Geological Society special publication, no. 252. London: The Geological Society.
- Miall, A. D. 2010. The geology of stratigraphic sequences. 2nd ed. Berlin ; New York: Springer.
- Mitchum, R. M. 1977. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 11: glossary of terms used in seismic stratigraphy. Seismic Stratigraphy - Applications to Hydrocarbon Exploration, editado por C. E. Payton, 26:205-12. Memoir - American Association of Petroleum Geologists. American Association of Petroleum Geologists.
- Veiga, G. D., E. Schwarz, L. A. Spalletti, y J. L. Massafiero. 2013. Anatomy And Sequence Architecture of the Early Post-Rift In the Neuquen Basin (Argentina): A Response To Physiography and Relative Sea-Level Changes. Journal of Sedimentary Research 83 (8): 746-65.
- Zavala, C. 1993. Estratigrafía y análisis de facies de la Formación Lajas (Jurásico medio) en el sector suroccidental de la Cuenca Neuquina. República Argentina: Universidad Nacional del Sur.
- . 1996. High-Resolution Sequence Stratigraphy in the Middle Jurassic Cuyo Group, South Neuquén Basin, Argentina. GeoResearch Forum, Advances in Jurassic Research 1-2: 295-304.



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

**Energía y Sociedad
aliados inseparables
Mendoza 2018**