

EVOLUCIÓN CINEMÁTICA Y ANÁLISIS DEL CONTROL ESTRUCTURAL EN LA DEPOSITACIÓN DE LOS RESERVORIOS CANALIZADOS DE LAS FORMACIONES COMODORO RIVADAVIA Y YACIMIENTO EL TRÉBOL, FLANCO NORTE DE LA CUENCA GOLFO SAN JORGE, ARGENTINA

Luciana Poveda¹, Ignacio Rovira²

1: Pan American Energy S.L. lpoveda@pan-energy.com

2: CGC S.A. ignacio_rovira@cgc.com.ar

Palabras clave: Formación Comodoro Rivadavia, Formación Yacimiento El Trébol, facies canalizadas, variogramas, análisis cinemático de fallas.

ABSTRACT

The fluvial deposits of the Comodoro Rivadavia and Yacimiento El Trébol formations of the Golfo San Jorge basin contain the classic, productive, reservoir rocks in the Cerro Dragón field. These are analyzed in detail for the static model building and analytic reservoir simulation on which waterflooding projects are based. Within this framework, the consolidation of the integrated static model of La Madreselva, Zorro III and La Madreselva Sur fields was carried out, combining 335 wells and seismic data in an area of 70 km². A total of 101 separated hydraulic units with permeable thicknesses between 0.5 m and 8 m were identified. For the definition and mapping of each one, variograms were used in order to estimate the main direction of data trend, which is interpreted as dominant for each channeled body. The objective of this contribution is to integrate the information obtained from the variograms of the interpreted reservoirs, with the kinematic analysis of the main faults in the area in order to: a) define the structural model present in the study area; b) structurally frame the sedimentary development of the channeled facies and c) determine the influence of the structure on the orientation of the fluvial system, demonstrating its temporal relationship.

INTRODUCCIÓN

La Cuenca del Golfo San Jorge ubicada en la Patagonia central argentina (Fig. 1A), entre los 45° y 47° de latitud sur, y los 71° y 66° de longitud oeste, se clasifica como una cuenca extensional intracratónica originada en el Mesozoico (Fitzgerald *et al.* 1990), con eje aproximadamente oeste-este. Si bien la cuenca presenta características esencialmente extensionales coexisten estructuras extensivas y compresivas, diferenciándose cinco sectores en base a su estilo tectónico: Flanco Norte, Flanco Sur, Centro de Cuenca, Faja Plegada y Flanco Occidental (Figari *et al.* 1999).

A partir de la interpretación de datos de subsuelo se define una columna estratigráfica para la cuenca (Fig. 2A) registrando espesores máximos de 8,5 km (Rodríguez y Littke 2001). La misma, posee los elementos esenciales para conformar los sistemas petroleros, especialmente las unidades Cretácicas del Grupo Las Heras y Chubut (Figari *et al.* 1999). Si bien existen potenciales rocas reservorios en la mayor parte de las unidades estratigráficas presentes en ambos Grupos, los principales reservorios de la cuenca se encuentran en el Grupo Chubut, en los depósitos de cursos fluviales entrelazados y meandriformes, siendo las formaciones productoras por excelencia la Fm. Comodoro Rivadavia (y sus equivalentes), seguida en importancia por la Fm. Mina del Carmen (y sus equivalentes) (Figari *et al.* 1999).

En este contexto, la zona de estudio que se encuentra comprendida por los yacimientos La Madreselva (LM), La Madreselva Sur (LMS) y Zorro III se ubica en el flanco norte de la cuenca, dentro de la concesión Cerro Dragón, (Fig. 1A y B). En conjunto, los tres yacimientos poseen un área aproximada de 70 km² y fueron desarrollados activamente desde la década del 60, con 335 pozos perforados a octubre del año 2020. Considerados actualmente como campos maduros, han producido en su mayor parte de los reservorios presentes en la formación Comodoro Rivadavia, en los cuales se realiza recuperación secundaria por inyección de agua desde 1993. Las facies fluviales canalizadas de las formaciones Comodoro Rivadavia y en menor medida, Yacimiento El Trébol, que contienen las rocas reservorio productoras, son de gran importancia en la confección de los modelos estáticos sobre los que se basan los estudios de simulación analítica y diseños de proyectos de recuperación secundaria que se aplican en los yacimientos descriptos. En estos modelos cada cuerpo canalizado es considerado como una unidad hidráulica independiente, cuya extensión y desarrollo depende de la interpretación del conjunto de datos utilizados en su mapeo.

Si bien la interpretación paleoambiental de los sistemas fluviales de ambas formaciones en la bibliografía es variada (Hechem y Strelkov 2002; Sylwan *et al.* 2011; entre otros), en Cerro Dragón se describen como sistemas fluviales de moderada a baja sinuosidad, cuyas estructuras evidencian corrientes tractivas unidireccionales, generalmente canalizadas con direcciones de flujo aproximadamente N-S (Cohen *et al.* 2022). Sin embargo, en el mapeo de los cuerpos arenosos, frecuentemente se observan tendencias que difieren de la ya mencionada N-S, dificultando el análisis predictivo del desarrollo de los reservorios.

Partiendo de la información utilizada en la consolidación del modelo estático unificado de los tres yacimientos, se analizaron los datos desde una perspectiva geoestadística y estructural a fin de robustecer la interpretación e identificar el rol de las estructuras extensionales en la disposición espacial de los reservorios. Para ello, se integró los datos de tendencias obtenidos de variogramas de capa con la evolución cinemática de las fallas normales presentes, a fin de identificar la influencia de estas sobre la distribución y orientación de los cuerpos canalizados, estableciendo si existe un patrón de comportamiento que nos facilite la interpretación y predicción con un menor grado de incertidumbre.

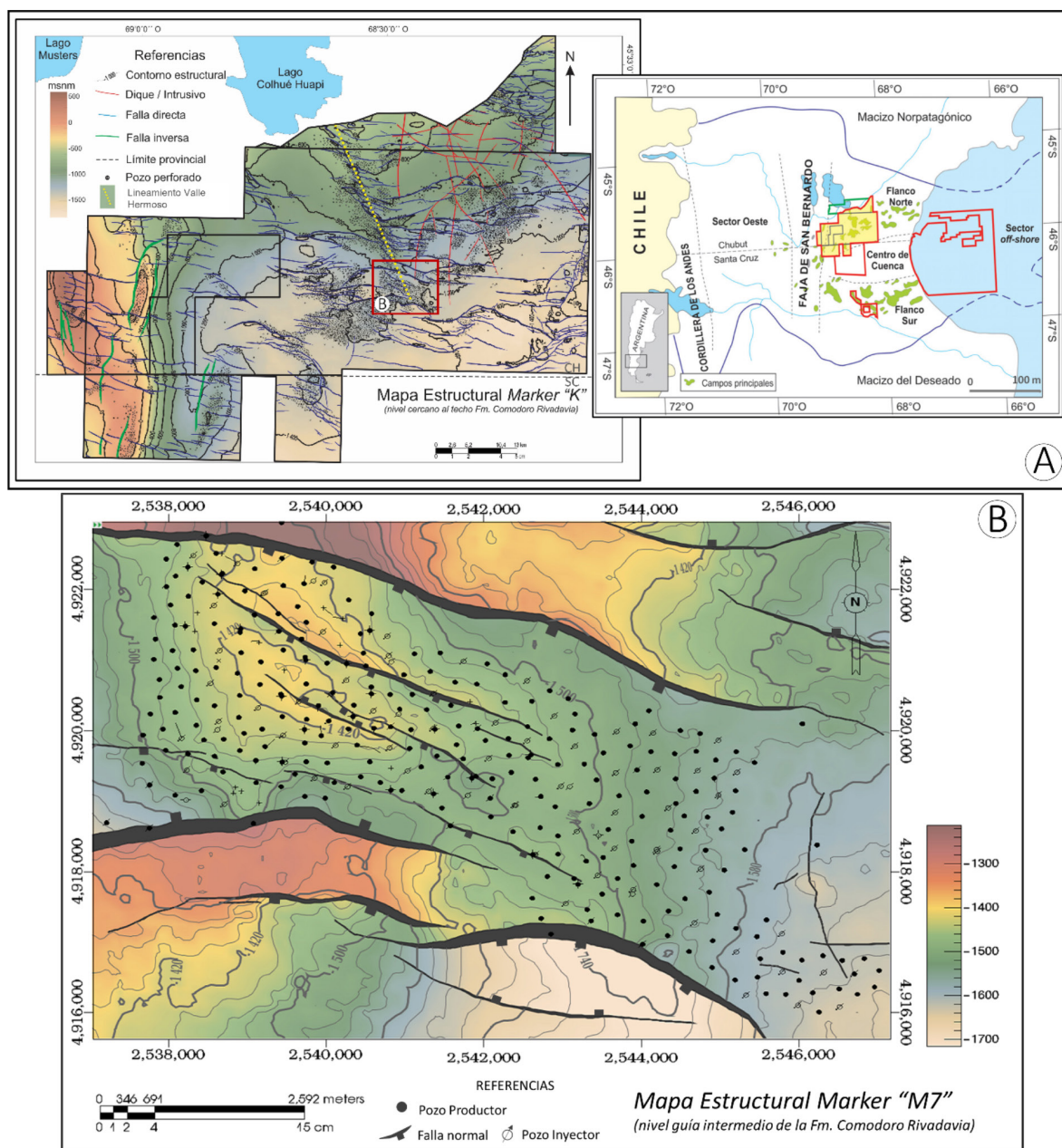


Figura 1. A) Mapa de ubicación, modificado de Cohen *et al.* (2022). B) Mapa estructural al marker "M7" del área de estudio, donde se observan los pozos utilizados para la confección del trabajo. Los colores cálidos indican una posición estructural más alta y los colores fríos una posición más baja.

MARCO GEOLÓGICO

Estratigrafía

Como fue expresado anteriormente, la presente contribución se centra en la influencia de las fallas normales en la depositación de las rocas reservorio del Grupo Chubut, en particular los

pertenecientes a la Formación Comodoro Rivadavia y la porción basal de la Formación Yacimiento El Trébol. En este apartado se describen brevemente las unidades estratigráficas pertenecientes al mencionado grupo (Fig. 2A).

La Formación Pozo D-129 fue definida por Lesta (1968) y está representada por sedimentos depositados en un ambiente lacustre en el inicio de la segunda fase extensional de la cuenca y está caracterizada principalmente por pelitas bituminosas, calizas y sucesiones clásticas con variable contenido tobáceo. Además de ser la principal roca generadora de la cuenca del Golfo San Jorge (Figari *et al.* 1999; Jalfin *et al.* 2002; Sylwan *et al.* 2008; entre otros), ha demostrado, en las últimas décadas, ser una importante roca productora de gas de la cuenca. Su equivalente lateral es la sucesión continental fluvial denominada Formación Matasiete (Sciutto 1981), de edad cretácica inferior, que constituye la unidad basal del Grupo Chubut. Según información del subsuelo, la Formación Pozo D-129 puede ser subdividida en 3 secciones, cada una de ellas con características distintivas (López Angriman *et al.* 2014). Los depósitos de la sección inferior se desarrollan asociados a depocentros aislados o parcialmente comunicados, y fuertemente controlados por los hemigrábenes neocomianos. En cambio, la sección media se caracteriza por un aparente equilibrio entre el espacio de acomodación de sedimentos disponible y la tasa de sedimentación. Los depocentros activos habrían evolucionado mostrando una mayor conexión, pero aún no se habrían integrado en su totalidad. La mayoría de los pozos que han atravesado esta sección muestran areniscas tobáceas intercaladas con niveles de calizas. La sección superior, por último, se caracteriza por un aumento en el aporte de sedimentos, especialmente de composición tobácea, el que supera el espacio de acomodación disponible y da lugar a procesos de agradación vertical. Para esta sección los depocentros se hallan mayoritariamente integrados (López Angriman *et al.* 2014; Cohen *et al.* 2022).

Suprayace la Formación Mina El Carmen que tradicionalmente ha sido un objetivo secundario en la prospección de hidrocarburos en la cuenca, debido a que los reservorios canalizados presentan escasa extensión areal, baja calidad petrofísica, y entrapamientos de difícil detección sin la tecnología de prospección disponible actualmente. En los últimos años, la realización de diversos estudios llevó al descubrimiento de gas y petróleo dentro de esta unidad. La exploración y desarrollo de hidrocarburos en la misma requieren de la identificación y caracterización tanto de los reservorios canalizados como de los reservorios no canalizados de origen diagenético (Cohen *et al.* 2022). La unidad fue definida por Lesta (1968) y su edad corresponde al Cretácico inferior. Está representada por una sucesión de sedimentos tobáceos depositados en ambientes fluviales compuestos, tanto por facies canalizadas como no canalizadas de planicies de inundación proximal y distal. También se interpretan depósitos denominados *sheetflood* o arroyadas en manto, los cuales corresponden a inundaciones repentinas de la llanura de inundación proximal (Paredes *et al.* 2011).

Continúa la Formación Comodoro Rivadavia y sus equivalentes temporales contienen la roca reservorio productora por excelencia del *play* petrolero en el área de concesión productiva de Cerro Dragón, acumulando aproximadamente el 90% de la producción total de petróleo. Mientras que, la producción asociada a la Formación Yacimiento El Trébol, resulta marginal por su baja contribución.

Los niveles productivos de la Formación Comodoro Rivadavia se encuentran conformados por una sucesión de areniscas lítico-feldespáticas con tamaño de grano variable desde conglomerados hasta arena fina con matriz arcillosa. Estos eventos están intercalados con pelitas y pelitas tobáceas gris verdoso a gris amarillento. De base a techo, se observa mayor contenido tobáceo en la base (Sección Tobácea, indicada con un intervalo color violeta en la figura 2B), gradando a una composición más silicoclástica hacia el techo. La edad de esta formación es de difícil determinación, pero la misma se estima que abarcaría desde el Cretácico inferior hasta el Cretácico superior (Lesta 1968; Fitzgerald *et al.* 1990; Archangelsky *et al.* 1994). La interpretación paleoambiental de la Formación Comodoro Rivadavia indica la presencia de sistemas fluviales de baja a moderada sinuosidad con morfologías asociadas a apilamientos verticales de canales multiepisódicos y multicanalizados con una importante amalgama lateral (Hechem y Strelkov 2002; Sylwan *et al.* 2011).

Ubicada estratigráficamente por encima de la Formación Comodoro Rivadavia (Fig. 2), la Formación Yacimiento El Trébol fue definida por Lesta (1968) y se estima su edad para el Cretácico superior. En cuanto a su litología, la misma presenta una sucesión de areniscas y pelitas donde el contenido tobáceo es considerado aproximadamente nulo. Los niveles arenosos presentan muchas similitudes con los pertenecientes a la subyacente Formación Comodoro Rivadavia.

La interpretación paleoambiental de esta unidad indica la presencia de depósitos fluviales análogos a los de la formación subyacente, los cuales agradan a facies deltáicas y depósitos fluviales anastomosados y meandriformes de baja energía con significativas variaciones de espesor sedimentario (Lesta 1968). Esto último estaría vinculado a una variación de la actividad tectónica a partir de una reactivación de fallas normales a nivel regional durante el Cretácico tardío (Sylwan *et al.* 2011).

Por sus similitudes litológicas y paleoambientales, el límite entre las dos formaciones es difuso y por ende considerado de tipo transicional (Lesta 1968; Hechem y Strelkov 2002). Para la zona de estudio, el mismo queda definido sísmicamente como un evento de alta amplitud y buena continuidad lateral que se correlaciona con un incremento en la curva de conductividad registrada en perfiles de pozo (Fig. 3). El mismo es denominado internamente como *Marker K* (indicado en color rojo en la Figura 2B, Serra *et al.* 2014).

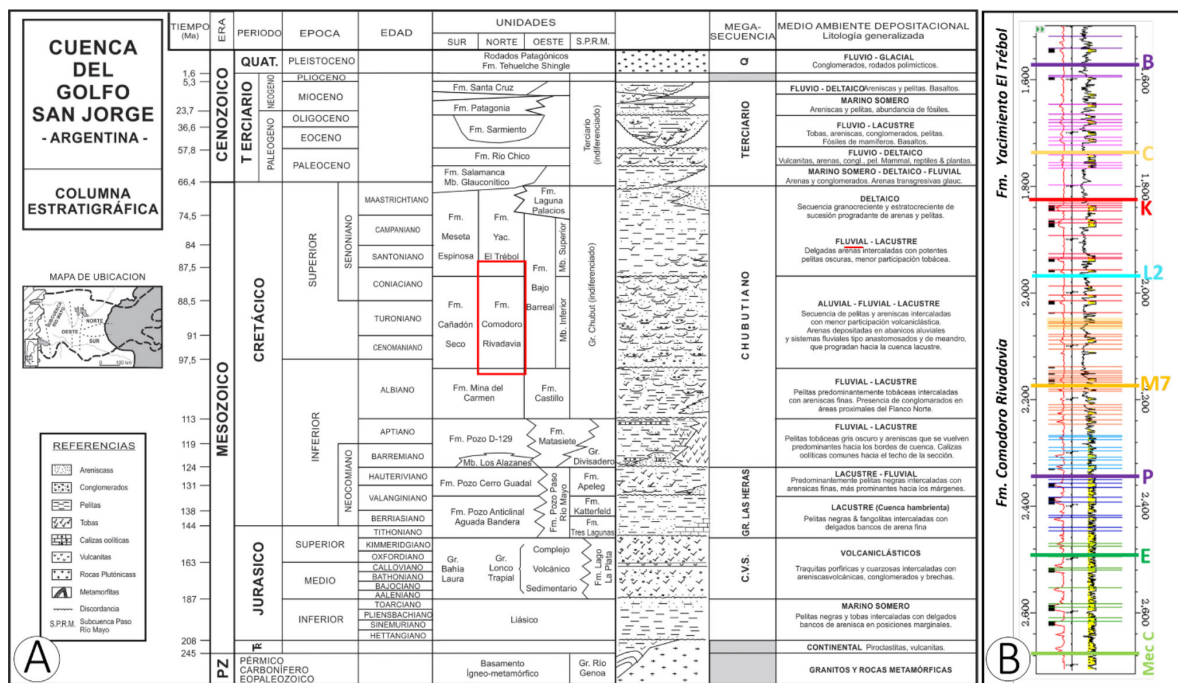


Figura 2. A) Columna estratigráfica de la Cuenca Golfo San Jorge, modificado de Cohen *et al.* (2022). B) Pozo representativo de la zona de estudio con perfiles de SP y Resistividad, donde se muestran las superficies guías utilizadas (*markers*) y el techo de las capas de interés para este estudio.

Estructura

El origen tectónico de la cuenca está vinculado con un proceso de rifting durante el Triásico a Jurásico inferior que afectó al basamento paleozoico preexistente permitiendo durante el Liásico el depósito de sedimentos continentales a marino someros en grábenes y hemigrábenes. Un posterior período de extensión durante el Jurásico medio culmina con los sedimentos clásticos y vulcanitas del Complejo Volcánico Sedimentario. En forma discordante se deposita la sucesión epiclástica del Grupo Las Heras, conocido informalmente como Neocomiano, el cual corresponde a una fase de rift tardío de la cuenca. A continuación, los sedimentos del Grupo Chubut se depositan en forma discordante y/o paraconcordante sobre un eje negativo de orientación oeste-este, con su depocentro desplazado hacia el este con respecto a los principales depocentros del ciclo anterior. En forma suprayacente la Formación Salamanca, corresponde a la primera transgresión marina del Océano Atlántico a principios del Terciario, evidencia un nuevo pulso extensional, esta vez asociado a la apertura del antes mencionado océano. Por último, los sedimentos continentales de los Grupos Río Chico y Sarmiento, las formaciones Chenque y Santa Cruz y los Rodados Patagónicos completan la columna estratigráfica de la zona de estudio (Lesta y Ferello 1972; Fitzgerald *et al.* 1990; Figari *et al.* 1999; Sylwan 2001; Cohen *et al.* 2022). Un rasgo para destacar es la existencia de numerosos cuerpos ígneos que se han identificado, en el Área de Cerro Dragón, en afloramientos emplazados dentro de unidades del. En subsuelo se reconocen diques y sills intruidos

en los Grupos Chubut, Río Chico y Sarmiento, donde las fallas previas y fracturas verticales a subverticales han funcionado como vías migratorias para el ascenso de magmas de composición básica (Plazibat *et al.* 2019). Además, se describen facies lávicas asociadas al volcanismo básico alcalino contemporáneo con el Grupo Sarmiento (Plazibat y Coluccia 2014).

Desde el punto de vista estructural, la zona de estudio está compuesta por una serie de fallas normales de alto ángulo, con rumbos variables tanto en la dirección Este – Oeste como en la dirección Noroeste – Sudeste. Regionalmente, el área de estudio corresponde a la porción central del Área de Cerro Dragón y pertenece a una faja de deformación de gran escala y rumbo Noroeste – Sursudeste denominado Lineamiento Valle Hermoso (Cohen *et al.* 2022). Este importante rasgo geológico es un componente clave para la migración y entrapamiento de los hidrocarburos de la zona.

Como puede observarse en la Figura 3, la Falla 1 es la falla principal del área, posee un rumbo similar a los mencionados anteriormente, y su inclinación es en la dirección Sur. En este sentido, las fallas 2, 3, 4, 5 y 6 se desarrollan de manera antitética o sintética, según corresponda, en relación con la primera.

Según lo expresado por Cohen *et al.* (2022), estas estructuras pueden ser clasificadas en tres grandes grupos desde un punto de vista tanto jerárquico como evolutivo y, a su vez, estos grupos

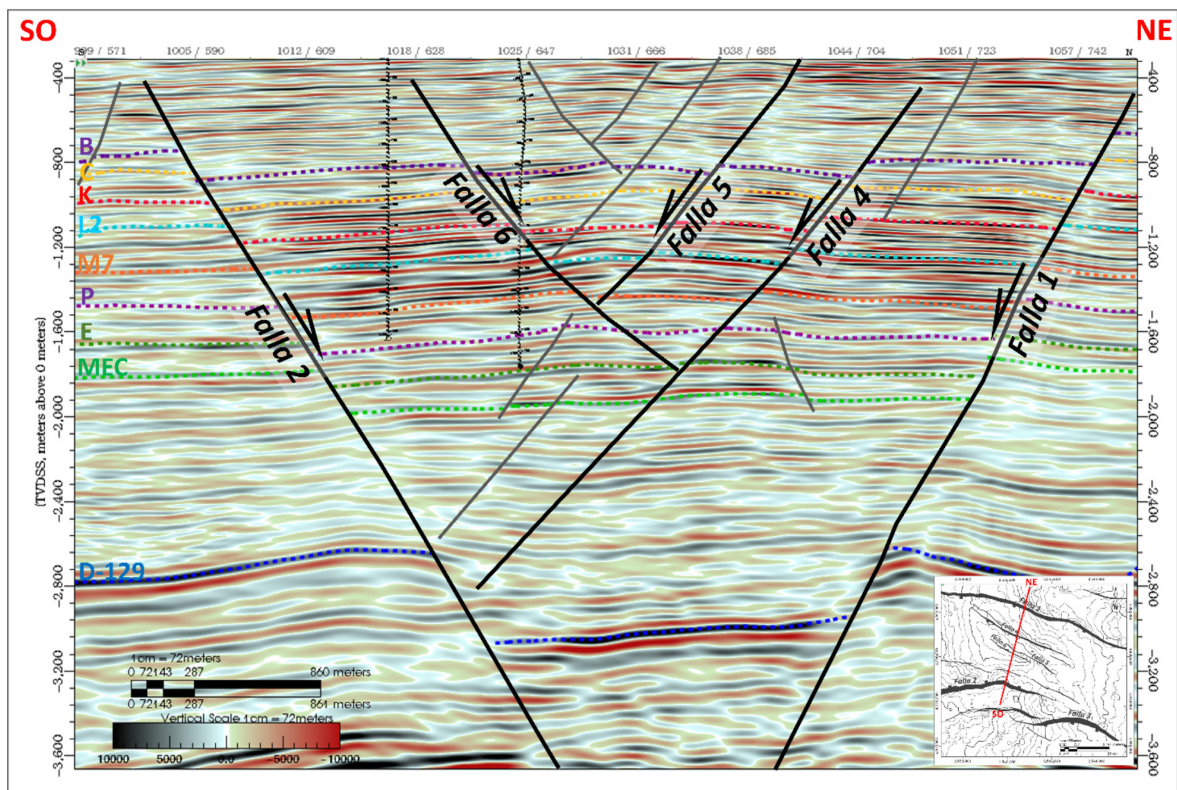


Figura 3. Línea sísmica en profundidad, de rumbo Noroeste-Sudoeste, de la zona de estudio. Se observan los principales *markers* y fallas utilizadas para la confección de este estudio.

pueden ser asociados a distintas fases de extensión en la cuenca. En primera instancia, las fallas de mayor orden o fallas de basamento son las responsables de la conformación de hemigrábenes neocomianos. El segundo y tercer tipo corresponde a las fallas de menor orden, que sólo afectan a la cobertura sedimentaria. Las primeras son generadas durante la depositación del Grupo Chubut, poseen un rumbo ENE-OSO a E-O y en algunos casos se ramifican a partir de las correspondientes al primer grupo, formando las clásicas estructuras de entrapamiento de la cuenca. El desarrollo de estas fallas tiene un gran efecto en la depositación de sedimentos sintectónicos de las formaciones Mina El Carmen y Comodoro Rivadavia, en los bloques bajos de las mismas. Por último, dentro del tercer tipo, se encuentran las fallas normales de rumbo E-O a ESE-ONO asociadas a la extensión que tuvo lugar durante el Cretácico Superior, durante la depositación de la Formación Yacimiento El Trébol (Cohen *et al.* 2022; Cayo *et al.* 2011; Crovetto *et al.* 2013; Paredes *et al.* 2013).

METODOLOGÍA

El análisis de datos para la construcción del modelo estático unificado, parte de la interpretación del cubo sísmico migrado en profundidad y de la información directa de perfiles de los 335 pozos perforados.

A partir de integración del modelo petrofísico y la correlación capa a capa, se definieron las unidades hidráulicas a mapear, su espesor permeable y porosidad. Cada unidad fue grillada calculando la dirección principal de correlación de datos a través de variogramas, interpretada como la tendencia dominante del cuerpo canalizado.

Los variogramas son modelos de variabilidad espacial, los cuales permiten identificar qué tan cerca se relacionan los puntos de datos entre sí. Cada variograma mide la tendencia y modela la correlación de datos en función de la distancia y la dirección. Esto permite proyectar valores de la variable en sitios en donde no existen puntos de datos. Para este trabajo, donde se pretende estimar la dirección principal de correlación, se utilizaron variogramas horizontales en dos direcciones, optando por el modelo esférico (Fig. 4).

El modelo estructural se realizó a partir de la interpretación del volumen de sísmica 3D en profundidad, sobre el cual se interpretaron 20 fallas, utilizadas para confeccionar el modelo estático y 11 horizontes sísmicos. Estos corresponden, de base a techo, al tope de la Formación Pozo D129; Top MEC A, Top MEC B y Top MEC C correspondientes a la Formación Mina El Carmen; los *markers* E, P, M7, L2, K correspondientes a la Formación Comodoro Rivadavia, y los *markers* C y B, asociados a los niveles basales de la Formación Yacimiento El Trébol (Fig. 2, Fig. 3). A partir de estos datos y con el objeto de comprender el comportamiento estructural de la zona de estudio, se empleó la metodología descrita y aplicada por distintos autores, entre los que se destacan Walsh y Watterson (1988, 1991),

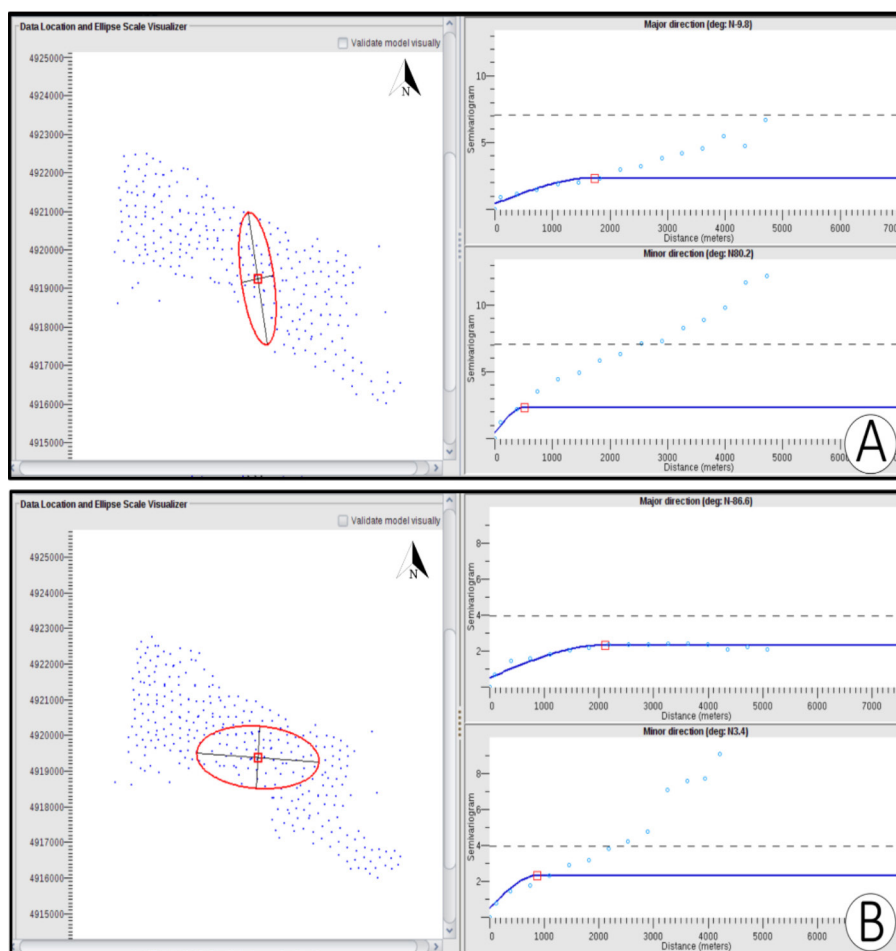


Figura 4. a) Ejemplo de variograma en la dirección principal de correlación de datos y su dirección ortogonal, para una capa con tendencia predominante N-S. b) Ejemplo de variograma en la dirección principal de correlación de datos y su dirección ortogonal, para una capa con tendencia predominante E-O.

Peacock y Sanderson (1994), Childs *et al.* (1995), Cayo *et al.* (2011), Paredes *et al.* (2013) y Giampaoli (2015), donde se analizan los controles estructurales de la depositación a través de la evolución cinemática de las fallas.

Para la confección de este trabajo fueron seleccionadas las seis estructuras más importantes del área de estudio con el fin de generar los perfiles de desplazamiento de cada una de ellas, mostrando en un gráfico la variación del rechazo vertical aparente de cada horizonte en función de la longitud de la falla (Fig. 6). Complementariamente se generaron mapas de desplazamiento (Fig. 6), los cuales representan los contornos de isodesplazamiento para la superficie de falla proyectado sobre un plano vertical paralelo al rumbo de cada estructura de interés (Barnett *et al.* 1987; Walsh y Watterson 1991). La interpretación de estos datos permitió realizar una clasificación de las estructuras según su ubicación, comportamiento y jerarquía estratigráfica y efectuar un análisis cronológico focalizado en las zonas de interés productivo de las formaciones Comodoro Rivadavia y Yacimiento El Trébol.

Resulta importante destacar que existen limitaciones metodológicas asociadas al contraste de las dimensiones de las fallas estudiadas. En el caso de las fallas profundas (1, 2 y 3), las cuales presentan altos valores de desplazamiento relativo vertical, las diferencias observadas entre superficies guía consecutivas se encuentran fuertemente vinculadas al error asociado con el método sísmico que, a esas profundidades se encuentra próximo al rango de 30 a 40 m. Dichos valores, comparados con las magnitudes de desplazamientos observados pueden ser consideradas no relevantes. En el caso de las fallas someras (4, 5, 6), la incertidumbre asociada a las superficies guía consecutivas está vinculada con el error humano en la toma de datos, si bien esto puede resultar en una fuente de error potencialmente muy grande, el control de calidad realizado sobre la misma garantiza una correcta aplicación del método.

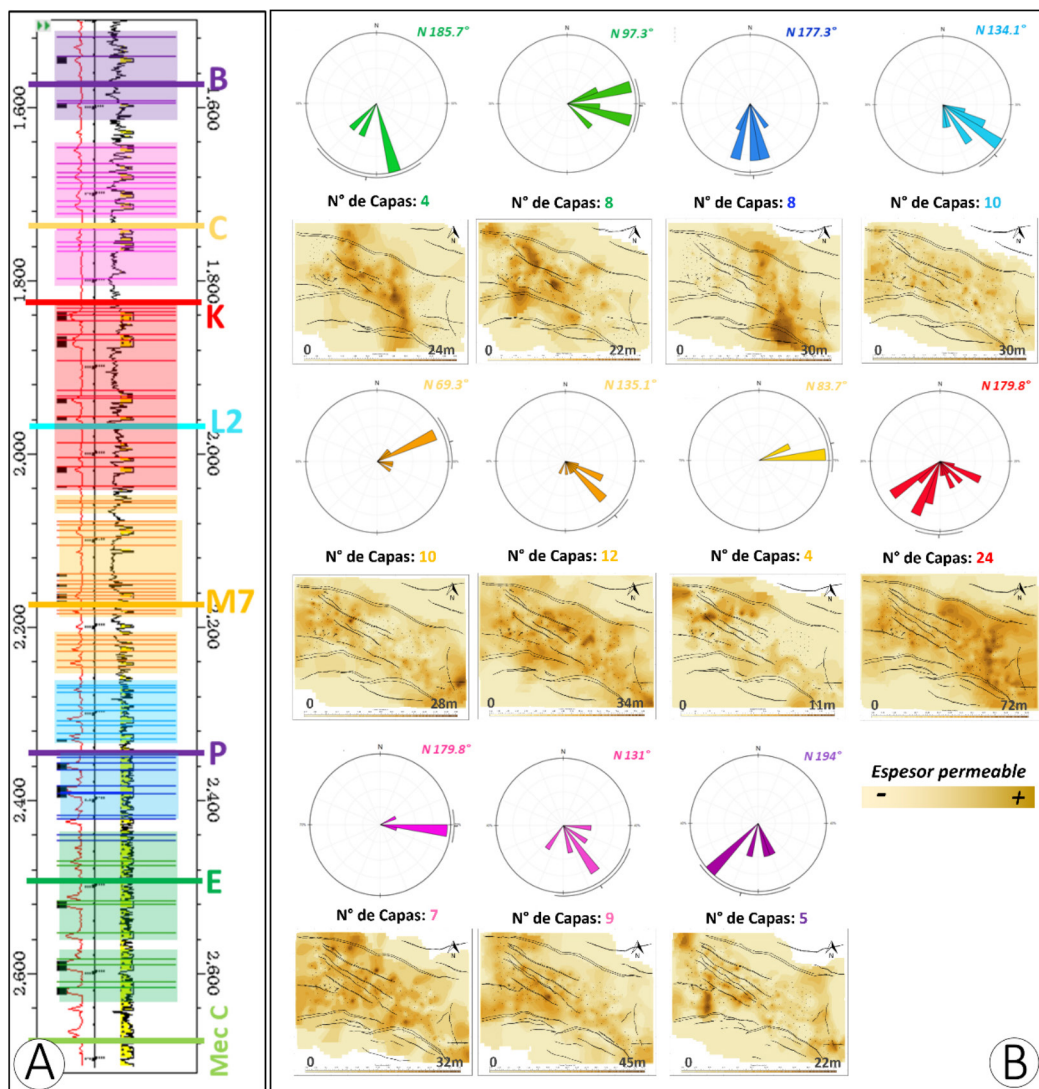


Figura 5. A) Pozo representativo del área con perfiles de SP y Resistividad, donde se muestra con diferentes colores los grupos de capas de similares orientaciones de tendencia. B) Diagramas de rosas, donde se muestra las orientaciones resultantes agrupadas según su dirección dominante, indicando el valor promedio y el número de capas consideradas. Se incluyen mapas de isoespesor permeable de las capas agrupadas.

RESULTADOS

Tendencias resultantes de los reservorios

A partir de la confección del modelo estático del área estudiada se identificaron 101 reservorios de interés dentro de las formaciones Comodoro Rivadavia y Yacimiento El Trébol (Fig. 5A) con espesores permeables entre 0,5 y 8 m y porosidades efectivas entre 8 y 24%. Las tendencias interpretadas a partir de los variogramas asociados al mapeo de estos reservorios se analizaron cronológicamente de base a techo, agrupando aquellas con orientaciones similares y graficándolas en diagramas de rosas. Finalmente, para cada conjunto de capas agrupadas se realizó un mapa de isoespesores permeables (Fig. 5B).

A partir de este análisis, se observaron cambios de entre 45 y 90 grados en las direcciones de los variogramas obtenidos, pasando de tendencias con una importante componente Norte-Sur a tendencias predominantemente Este-Oeste y Noroeste-Sudeste, subparalelas al rumbo de las fallas (Fig. 5B). Por otro lado, se observó que el conjunto de reservorios canalizados con tendencias aproximadamente Norte-Sur se concentran al este de la zona de estudio, donde se exhibe un ambiente menos compartimentalizado por las estructuras, tal como se observa en la figura 5B. Mientras que los reservorios con tendencias predominantes Este-Oeste y Noroeste-Sudeste se desarrollan en el sector occidental, donde se observa mayor estructuración (Fig. 5B).

Cinemática de fallas

A partir de la confección de los perfiles y mapas de desplazamiento, se lograron clasificar las fallas presentes en el área de estudio en fallas profundas, las cuales afectan al basamento y/o niveles profundos de la Fm. Pozo D-129 y fallas someras que afectan a la cobertura sedimentaria en niveles estratigráficos superiores a la Fm. Pozo D-129. El primer grupo consta de tres fallas (Falla 1, Falla 2 y Falla 3) verticales a subverticales, con importantes desplazamientos e inclinaciones tanto al Sur (Fallas 1 y 3) como al Norte (Falla 2, Fig. 6). Las mismas conforman los límites del área productiva y la separan de los bloques vecinos. Según los perfiles confeccionados, estas fallas poseen los mayores valores de desplazamiento (500 a 700 m) en el techo de la Fm. Pozo D-129, los cuales disminuyen considerablemente hasta alcanzar 200 a 300 m para los techos de las formaciones Mina El Carmen y Comodoro Rivadavia (MEC y *marker K* en Fig. 6, respectivamente).

En el caso de la Falla 1, tanto en los perfiles como en los mapas de desplazamiento puede observarse que estaría compuesta por dos segmentos bien diferenciados y con desplazamiento contrastantes para tiempos cercanos al techo de la Formación Pozo D-129. Dicho comportamiento fue interpretado a partir de la presencia de dos semielipses separadas por un seno asociado a bajos valores de desplazamiento vertical. Estos segmentos separados se acoplarían actuando de manera

conjunta para tiempos de las formaciones Mina El Carmen, Comodoro Rivadavia y Yacimiento El Trébol. Un comportamiento de análogas características es identificado para la Falla 3, con magnitudes de desplazamiento similares en ambos segmentos.

Las fallas someras (Fallas 4, 5 y 6) conforman estructuras de menor rechazo vertical aparente y se ubican principalmente en el centro-oeste del área productiva. Sus valores de desplazamiento vertical para las formaciones Comodoro Rivadavia y Yacimiento El Trébol se encuentran entre 20 y 100 m. El aumento de este se da de manera paulatina desde el techo de la Formación Mina El Carmen y la base de la Formación Comodoro Rivadavia (MEC en Fig.6), alcanzando el pico de actividad para los tiempos de transición entre el techo de la Formación Comodoro Rivadavia y la base de la Formación Yacimiento El Trébol (*marker K* en Fig. 6). La falta de evidencias de rechazos significativos para estas fallas en tiempos de la Formación Mina El Carmen, podrían sugerir que las mismas habrían sido nucleadas en tiempos de la Formación Comodoro Rivadavia.

Estas fallas son de gran importancia para el desarrollo productivo de la zona occidental del área de estudio ya que delimitan bloques menores dentro de la misma y, a partir de los registros de presiones en las capas y evaluación de la respuesta de los pares de pozos inyector-productor, fueron definidas como sellantes para el proyecto de recuperación secundaria y, por ende, son consideradas como trampas para los fluidos de interés prospectivo.

A partir de los resultados expresados anteriormente, se analizó cronológicamente el comportamiento de las fallas de interés en los estadios donde se observaron cambios de tendencia en las canalizaciones con diferencias de entre 45 y 90 grados. Para ello, se contrastaron los perfiles de desplazamiento de las fallas, involucrando horizontes consecutivos, con la variación en las direcciones de correlación de datos. En esta instancia se observó que los cambios de tendencia en las canalizaciones de Norte-Sur a Este-Oeste, serían coincidentes con movimiento en las fallas someras (Fallas 4, 5 y 6 en Fig. 6) ubicadas en el sector occidental de la zona de estudio, mientras que las fallas profundas (Fallas 1, 2 y 3 en Fig. 6) no registrarían desplazamientos significativos para estos tiempos. Bajo las mencionadas condiciones, las mayores >acumulaciones de espesores permeables tendrían lugar en el sector occidental de la zona de estudio. Por el contrario, en los períodos de cese en la actividad tectónica de estas fallas, las acumulaciones de espesor permeable mostrarían principalmente direcciones preferenciales Norte-Sur, trasladándose estas hacia el sector oriental de la zona de estudio.

A modo de ejemplo, en la Figura 7B se observa el caso de los tres primeros conjuntos de reservorios agrupados (de base a techo) por similitud en las direcciones de tendencias resultantes y depositados entre los *markers* MEC y P. Los primeros cuatro reservorios fueron depositados en un tiempo denominado T1, presentan variogramas con direcciones dominantes Norte-Sur, y sus espesores permeables se concentran en el sector occidental de la zona de estudio. A continuación, las ocho unidades hidráulicas depositadas en para el tiempo T2, muestran direcciones de tendencia principalmente Este-Oeste encontrándose los mayores espesores permeables en el sector occidental,

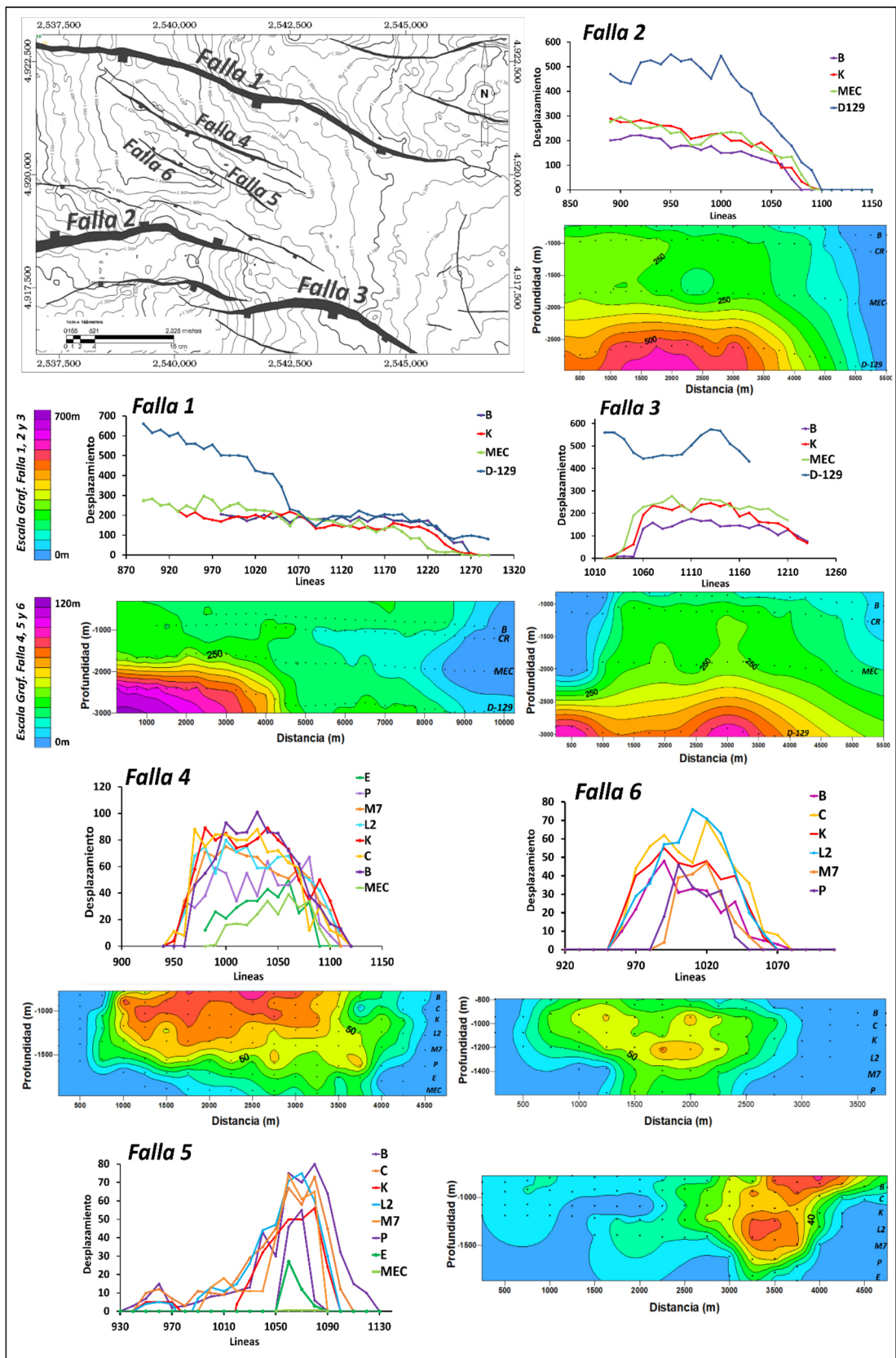


Figura 6. Perfiles y mapas de desplazamiento de las seis fallas principales y su ubicación en la zona de estudio.

subparalelos a los planos de falla. Finalmente, el conjunto de las ocho unidades depositadas en el tiempo T3, vuelven a mostrar tendencias con direcciones Norte-Sur y espesores permeables con acumulaciones más potentes hacia porción oriental del área de estudio.

Por otro lado, en la Fig. 7C se observan los perfiles y mapas de desplazamiento de las fallas interpretadas como profundas o de basamento (Fallas 1, 2 y 3) y de las fallas someras (4 y 5). En los mencionados perfiles se comparan las superficies consecutivas del techo de la Formación Mina del Carmen y *marker* E, las cuales funcionan como guía para los grupos de capas depositados durante T1 y T2. En las fallas profundas 1, 2 y 3 ambas superficies exhiben valores similares de rechazos verticales aparentes. Esto podría indicar que la naturaleza de los movimientos registrados

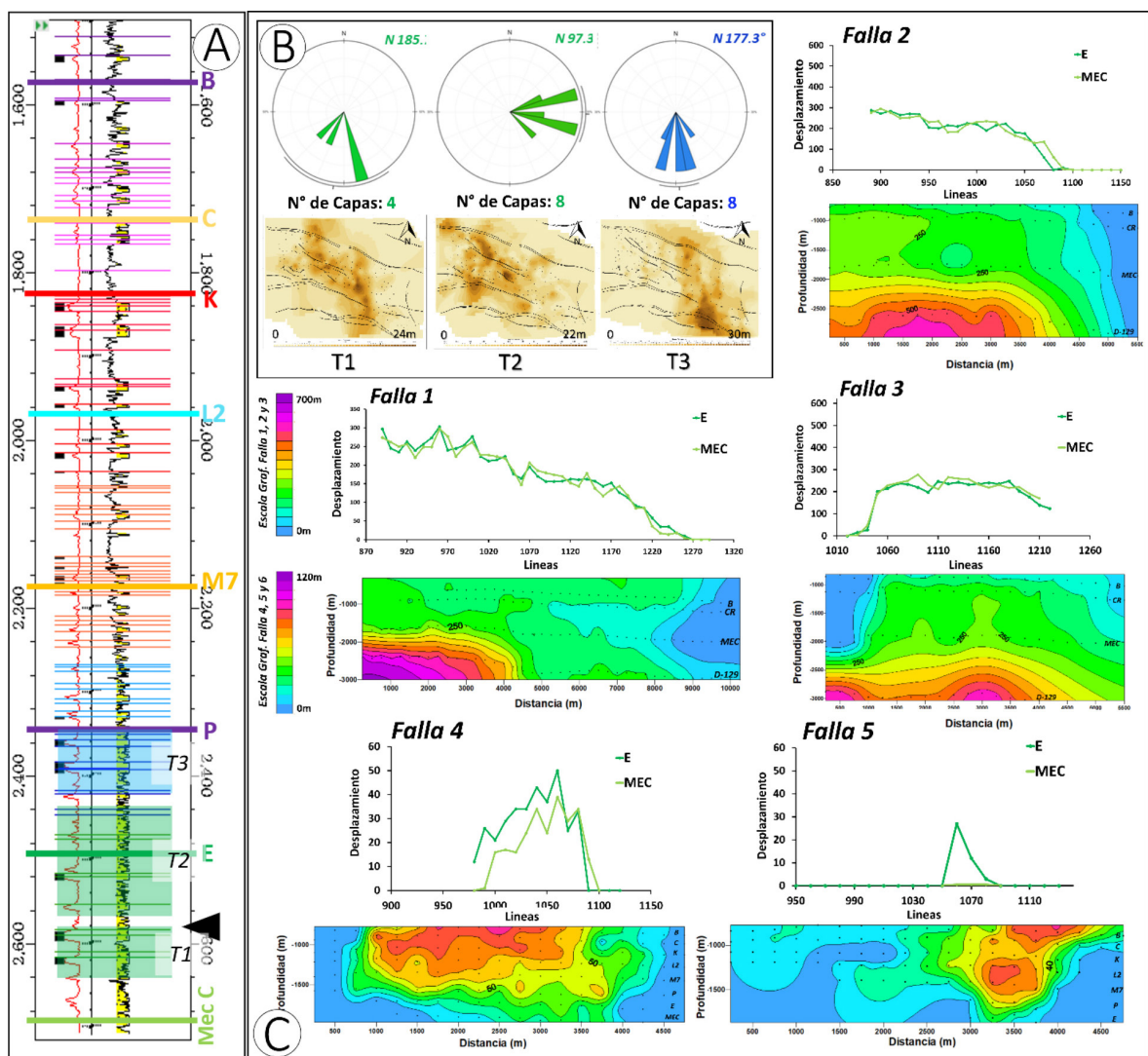


Figura 7. a) Pozo representativo del área con perfiles de SP y Resistividad, donde se muestra: las superficies guía dentro de las formaciones Comodoro Rivadavia y Yacimiento El Trébol; de base a techo, los tres primeros grupos de capas identificadas, depositadas en tiempos denominados T1, T2 y T3. b) Diagrama de rosas y mapas de isoespesor permeable de los tres grupos de capas depositadas en tiempos T1, T2 y T3. c) Perfiles de desplazamiento de las fallas de basamento 1, 2 y 3; y de las fallas de cobertura 4 y 5, contrastando el rechazo vertical aparente del Techo de la Formación Mina del Carmen y de la superficie guía denominada *marker* E. Mapas de desplazamiento de las 5 fallas.

tanto en T1 como en T2 se habrían dado en pulsos de baja intensidad asociada a ajustes verticales que no habrían ejercido un control estructural en la depositación y acumulación de los espesores permeables observados.

Por el contrario, las fallas someras 4 y 5 muestran un marcado aumento en el desplazamiento vertical de la superficie del *marker* E respecto del techo de la Formación Mina El Carmen (Fig. 7B). Este movimiento relativo de las estructuras para el tiempo T2, habría generado espacio de acomodación y basculamiento de las pendientes lo cual tendría un importante efecto en el desarrollo de las canalizaciones, modificado su curso y rellenado en parte los espacios generados. Dicho fenómeno puede observarse, para los reservorios depositados en T2 respecto de T1 y T3, en los mapas de isoespesor de la Figura 7B.

La secuencia descrita anteriormente se repite en las diferentes secciones analizadas, tanto para los reservorios de la Formación Comodoro Rivadavia como para los de la sección basal de la Formación Yacimiento El Trébol, evidenciando la influencia que ejerce la actividad de las fallas someras sobre las tendencias de los reservorios canalizados de ambas formaciones.

A nivel local, cabe mencionar que tanto T1 como T2, presentan una significativa acumulación de espesor permeable entre las Fallas 1 y 4 en el sector noroccidental de la zona de estudio. Esta

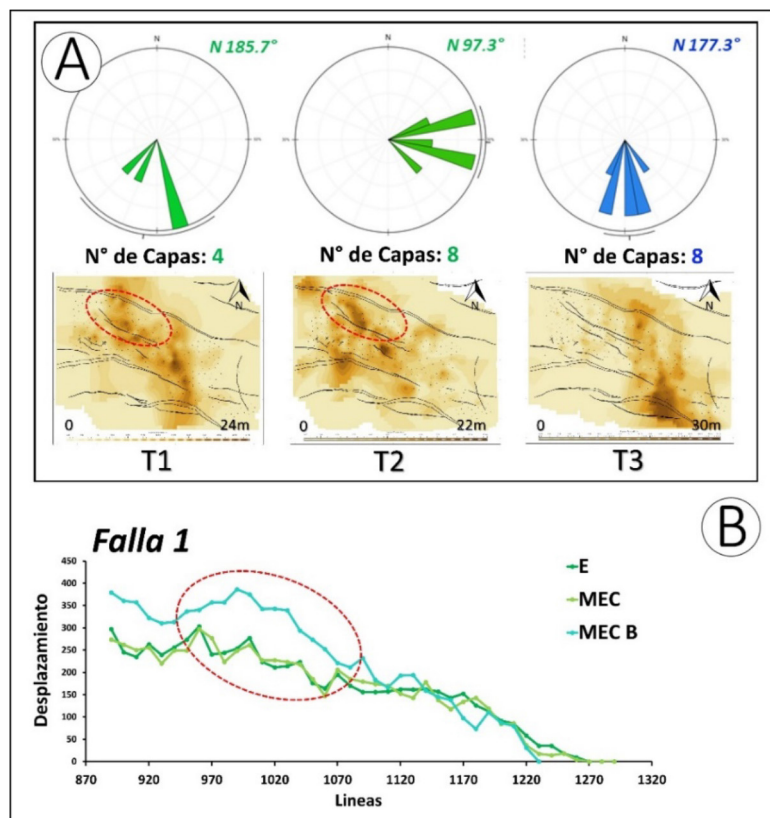


Figura 8. A) Diagrama de rosas y mapas de isoespesor permeable de los tres grupos de capas depositadas en tiempos T1, T2 y T3. B) Perfil de desplazamiento de la Falla 1 contrastando el rechazo vertical aparente del Top MEC B, Techo de la Formación Mina del Carmen (MEC) y de la superficie guía *marker* E.

tendencia se indica con un círculo punteado de color rojo en Fig. 8A. Estas acumulaciones estarían vinculadas a un movimiento tectónico previo a T1, ocurrido para el tiempo de Top MEC-B (Fig. 8B) donde se registra un aumento de desplazamiento vertical de hasta 150 m en el tramo occidental de la Falla 1. De esta manera el aumento de espesor de reservorios en este sector para tiempos de T1 y T2 podría responder a una paleogeografía local heredada de un tiempo anterior.

DISCUSIÓN

Posibles situaciones análogas a diferentes escalas son presentadas por Holbrook y Schumm (1999), donde los ríos de baja pendiente son especialmente sensibles a sutiles deformaciones las cuales podrían alterar el curso los cauces fluviales. Según estos autores, estas desviaciones aparecerían en el registro litológico como una concentración preferencial de fajas de canales en áreas con subsidencia y/o deflexiones de paleocorrientes hacia bajos tectónicos.

En uno de los casos analizados en la presente contribución puede notarse, además, un posible efecto de paleogeografía heredada de acuerdo con lo expresado por Bacay y Allard (2013). Estos efectos remanentes de rasgos topográficos asociados a tiempos anteriores contribuirían, entre otros factores, a la compleja dinámica de los sistemas fluviales sintectónicos.

Por otro lado, de acuerdo con lo postulado por Paredes *et al.* (2013), las fallas de cobertura sedimentaria fueron nucleadas en tiempos posteriores a las formaciones Pozo D-129 y Mina El Carmen. Esta tendencia se confirma a partir de los perfiles de desplazamiento confeccionados para las fallas 4, 5 y 6. Los cuales muestran un importante aumento de los valores de desplazamiento desde el tope de la Formación Mina El Carmen hasta el techo de la Formación Comodoro Rivadavia (*marker K*) y la base de la Formación Yacimiento El Trébol (*markers B y C*).

Las fallas estudiadas lograron clasificarse en someras y profundas y, a su vez, dicha relación fue expresada en función a su posición relativa respecto al techo de la Formación Pozo D-129. Según los antecedentes bibliográficos, esta unidad posee un importante espesor de rocas de grano fino en su sección superior. Acorde a lo expresado por Higgins y Harris (1997) y Giampaoli (2015), la existencia de una cobertura sedimentaria de grano fino con gran espesor y comportamiento mecánico dúctil llevaría a la generación de desacoples estructurales entre fallas profundas y someras. Las fallas profundas que involucrarían al basamento controlan la distribución de espesores de los estratos más profundos y forman parte de la fábrica estructural pre-existente sobre la cual se desarrolla el sistema de fallas más joven que afecta principalmente a las secuencias del Grupo Chubut y del Cenozoico (Giampaoli 2015). Por este motivo, sería posible que las fallas identificadas en este trabajo como someras, o asociadas al desarrollo de la cobertura sedimentaria tomen un rol principal en la zona de estudio, otorgando un importante control estructural sobre los depósitos fluviales suprayacentes a la mencionada unidad lacustre.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos permitieron realizar un análisis tectonoestratigráfico de niveles productivos del yacimiento Cerro Dragón (Cuenca del Golfo San Jorge). A partir del mismo se observaron importantes variaciones en las tendencias de los variogramas asociados al mapeo de reservorios canalizados interpretados en la Formación Comodoro Rivadavia y sección basal de la Formación Yacimiento El Trébol. Estas tendencias motivaron estudios estructurales específicos para evaluar el control tectónico en la sedimentación fluvial.

Los perfiles y mapas de desplazamiento de las estructuras permitieron identificar dos grupos de fallas con comportamientos y localizaciones bien diferenciados. Por un lado, las fallas profundas, las cuales se ubican en los márgenes de la zona de estudio, poseen los mayores rechazos verticales y su pico de actividad tectónica relativa corresponde al techo de la Formación Pozo D-129, según el presente análisis que excluye superficies infrayacentes. En contraposición, las fallas someras se habrían nucleado durante los tiempos de las formaciones Comodoro Rivadavia y Yacimiento El Trébol. Las mismas se ubican en el centro-oeste de la zona de estudio y presentan menores rechazos verticales que las antes mencionadas. Su pico de actividad tectónica relativa fue identificado sobre la transición entre el techo de la Formación Comodoro Rivadavia y la base de la Formación Yacimiento El Trébol. Por otro lado, se propone a la sección superior de la Formación Pozo D-129, como una zona de desacople mecánico entre las fallas profundas y someras, la cual habría condicionado el efecto de las fallas profundas, favoreciendo el control estructural de las fallas someras sobre la depositación de los sedimentos suprayacentes.

A partir de la integración de ambas técnicas se identificó una fuerte correlación entre la actividad tectónica ocurrida en tiempos de la Formación Comodoro Rivadavia y la sección basal de la Formación Yacimiento El Trébol y el desarrollo de los reservorios canalizados asociados a estas unidades. Los distintos pulsos tectónicos, identificados como de baja intensidad, habrían generado espacio de acomodación y basculamiento en las pendientes. En respuesta sedimentaria, dicho espacio fue ocupado en parte por eventos fluviales ubicados en la zona oriental del área de estudio. Dichos eventos estarían evidenciados por rotaciones en la tendencia de los variogramas hacia un carácter predominantemente Este-Oeste. Una vez rellenados estos espacios y estabilizado el sistema, los cauces habrían vuelto a ocupar su posición natural en la porción oriental de la zona de estudio retomando el carácter de los variogramas con tendencias Norte-Sur. En este sentido, la zona oriental del área estudiada fue interpretada como una zona preferencial de escurrimiento.

Las implicancias de la presente contribución en materia del análisis de tendencias de reservorios canalizados vinculados a los movimientos de las fallas normales someras deben ser tenidas en cuenta al momento de confeccionar los mapas de las unidades productivas en la consolidación de los modelos estáticos. Su consideración es de gran importancia ya que se ha evidenciado que si bien las tendencias dominantes de los reservorios canalizados en el flanco norte de la

cuenca son principalmente Norte-Sur, los eventos con tendencias predominantemente Este-Oeste en proximidades de fallas someras pueden ser causales de importantes acumulaciones de arenas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores le agradecen a Pan American Energy Group por permitir el uso de los datos para la confección de este trabajo y a Carolina Crovetto y a los revisores por sus valiosos comentarios sobre el manuscrito.

REFERENCIAS CITADAS

- Archangelsky, S., Bellosi, E.S., Jalfin, G.A. y Perrot, C. 1994. Palynology and alluvial facies from the mid-retaceous of Patagonia, subsurface of San Jorge Basin, Argentina. *Cretaceous Research* 15 (2): 127-142.
- Barnett, J.M., Mortimer, J., Rippon, J., Waksh, J.J. and Watterson, J., 1987. Displacement geometry in the volume containing a single normal fault. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*. 71: 925-937.
- Bacay, S.M y Allard, J.O. 2013. Secuencias aluviales de alta y baja acomodación definidas a partir de perfiles eléctricos convencionales: meso-arquitectura de la Formación Comodoro Rivadavia, Yacimiento El Trébol-Escalante. 1° Jornadas Geológicas de la Cuenca del Golfo San Jorge, Resumen 12, Comodoro Rivadavia.
- Cayo, E., Crovetto, C., Plazibat, S., Stein, J., Díaz, M. y Paredes, J.M. 2011. Control tectónico sobre la sedimentación de la Fm. Mina Del Carmen (Albiano) en el yacimiento Cerro Dragón, Cuenca Del Golfo San Jorge, Argentina. VIII Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Trabajos Técnicos: 397-418, Mar del Plata.
- Crovetto, C., Plazibat, S., Díaz, M., Stein, J., Cayo, E. y Paredes, J.M. 2013. Evolución estructural y geodinámica de sistemas de fallas de la Cuenca del Golfo de San Jorge: aplicaciones del método de análisis cinemático de fallas en el Yacimiento Cerro Dragón. 1° Jornadas Geológicas de la Cuenca del Golfo San Jorge, Resumen 12, Comodoro Rivadavia.
- Childs, D., Watterson, J. y Walsh, J.J. 1995. Fault overlap zones within developing normal fault systems. *Journal of Geological Society of London* 152: 535-549.
- Cohen, M.E., Castillo, V.V., Fernández, S.E., Galarza, B.J., García Torrejón, M., Lucena, L., Millo, L., Plazibat, S., Poveda, L.M., Scasso, J.A. y Vernengo, L.A. 2022. Exploración y desarrollo de hidrocarburos en Cerro Dragón, Cuenca Golfo San Jorge, Argentina. Relatorio XXI Congreso Geológico Argentino. 1463 – 1494, Puerto Madryn.
- Fitzgerald, M.G., Mitchum Jr., R.M., Uliana, M.A. y Biddle, K.T. 1990. Evolution of the San Jorge Basin, Argentina. *The American Association of Petroleum Geologists, Bulletin*, 74: 879- 920, Tulsa.
- Figari, E., Strelkov, E.E., Laffitte, G., Cid de la Paz, M., Courtade, S., Celaya, J., Vottero, A., Lafourcade, P., Martínez, R., Villar, H. 1999. Los sistemas petroleros de la Cuenca del Golfo San Jorge: Síntesis estructural, estratigráfica y geoquímica. *Boletín de Informaciones Petroleras*, Tercera Época 16: 54-90.

- Giampaoli, P. 2015. Caracterización de sistemas de fallas extensionales utilizando perfiles y mapas de desplazamiento: Ejemplos del Cretácico de la Cuenca del Golfo San Jorge. *Revista de la Asociación Geológica*. 72 (1): 107 - 109
- Hechem, J.J. y Strelkov, E.E. 2002. Secuencia sedimentaria mesozoica del Golfo San Jorge. En: Haller, J.M. (Ed.), *Geología y recursos Naturales de Santa Cruz*. 15° Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 129-147, Buenos Aires.
- Higgins, R. I. y Harris, L. B. 1997. The effect of cover composition on extensional faulting above re-activated basement faults: results from analogue modelling. *Journal of Structural Geology*. 19. No.1: 89 - 97.
- Holbrook, J. y Schumm, S.A. 1999. Geomorphic and sedimentary response of rivers to tectonic deformation: a brief review and critique of a tool for recognizing subtle epeirogenic deformation in modern and ancient settings. *Tectonophysics*. 305: 287-306.
- Lesta, P.J. 1968. Estratigrafía de la Cuenca del Golfo San Jorge. III Jornadas Geológicas Argentinas, Actas I: 171-182, Buenos Aires.
- Lesta, P. y Ferello, R. 1972. Región extrandina de Chubut y norte de Santa Cruz. En: Leanza, A.F. (Ed.), *Geología Regional Argentina*, Academia Nacional de Ciencias, 602-653, Córdoba.
- Paredes, J.M., Colombo, F., Allard, J.O. y Foix, N. 2011. Alluvial architecture of fluvial successions in pyroclastic-rich environments: the Castillo Formation (Albian) in the Golfo San Jorge basin, Argentina. 28th IAS Meeting of Sedimentology, Abstract p. 97, Zaragoza (Spain).
- Paredes, J.M., Plazibat, S., Crovetto, C., Stein, J., Cayo, E. y Schiuma, A. 2013. Fault kinematics and depocenter evolution of oil-bearing, continental successions of the Mina del Carmen Formation (Albian) in the Golfo San Jorge basin, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 46: 63-79.
- Peacock, D.C.P., Sanderson, D.J., 1994a. Geometry and development of relay ramps in normal fault systems. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 78: 147-165
- Plazibat, S. y Coluccia A. 2014. Relaciones estratigráficas de los cuerpos ígneos terciarios, área Cerro Dragón, Cuenca del Golfo San Jorge. 9° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Abstracts Extendidos: 111-117, Mendoza.
- Plazibat, S., Rasgido, A., Paredes y J.M. 2019. Subsurface characterization of Cenozoic igneous activity at Cerro Dragon area (Golfo San Jorge Basin, central Patagonia): Implications for basin evolution and hydrocarbon prospectivity. *Journal of South American Earth Sciences*, 96-102389.
- Rodriguez, J.F. y Littke, R. 2001. Petroleum generation and accumulation in the Golfo San Jorge Basin, Argentina: a basin modeling study. *Marine and Petroleum Geology* 18: 995-1028.
- Sylwan, C., Droeven, C., Iñigo, J., Mussel, F. y Padva, D. 2011. Cuenca del Golfo San Jorge. 8° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos. Simposio Cuencas Argentinas: visión actual, Actas Electrónicas: 139-183, Buenos Aires.
- Serra, F., Fernández, S., Coluccia, A., Crovetto, C., Plazibat, S., Schiuma, A., Galarza, B., Cohen, M., Díaz, M.T., López Alvarado, O., Rasgido, A. y Aimar, E. 2014. Mapeo de las Formaciones Comodoro Rivadavia y Yacimiento El Trébol en el área Cerro Dragón, Cuenca del Golfo de San Jorge, Argentina: Un aporte al conocimiento regional de la cuenca. IX Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Abstracts Extendidos: 103-109, Mendoza.

- Walsh, J.J. y Watterson, J. 1991. Geometric and kinematic coherence and scale effects in normal fault systems. En: Roberts, A.M., Yielding, G. y Freeman, B. (Eds.), The Geometry of Normal Faults, Geological Society Special Publication 56: 193-203.
- Walsh, J.J. y Watterson, J. 1988. Analysis of the relationship between displacements and dimensions of faults. *Journal of Structural Geology* 10, 239-247.