

CARACTERIZACIÓN DE SISTEMAS DE FALLAS EXTENSIONALES UTILIZANDO PERFILES Y MAPAS DE DESPLAZAMIENTO: EJEMPLOS DEL CRETÁCICO DE LA CUENCA DEL GOLFO SAN JORGE

Pablo GIAMPAOLI

YPF S.A., Buenos Aires. Email: pablo.giampaoli@ypf.com

RESUMEN

Se utilizaron mapas y perfiles de desplazamiento de las fallas normales del subsuelo en la región de Manantiales Behr en la cuenca Golfo San Jorge para analizar los controles que rigieron el crecimiento y propagación de las fallas, la evolución cinemática del sistema extensional y la migración y entrapamiento de los hidrocarburos. Se reconocieron dos tipos de fallas: aquellas que afectan al basamento y a la cobertura sedimentaria, y fallas que involucran solo a la cobertura sedimentaria. El crecimiento vertical de las fallas dentro de la cobertura sedimentaria estuvo restringido por las variaciones litológicas y por la intersección con la superficie del terreno. Las fallas que involucran al basamento son sin-sedimentarias y presentan relaciones D_{max}/L y de aspecto que permiten diferenciarlas de los planos de falla más someros. La coherencia geométrica observada en el perfil y en el mapa de desplazamiento agregado sugiere una evolución cinemática sincrónica para el sistema de fallas de cobertura. Las relaciones entre los tamaños de las fallas podrían ser indicativas de un mecanismo de crecimiento por conexión temprana de los segmentos individuales y posterior incremento en el desplazamiento. La fábrica preexistente del basamento tuvo poca influencia en el desarrollo de las fallas de cobertura debido a que la Formación Pozo D-129 actuó como nivel de desacople estructural. El escaso grado de conexión entre los tramos someros y profundos de las fallas desfavorece la hipótesis de carga de los hidrocarburos del yacimiento desde una cocina profunda. El mapeo de los segmentos de falla con mayores valores de desplazamiento y las zonas de transferencia permiten delinear la localización de las trampas de hidrocarburos en el bloque alto.

Palabras clave: *Fallas normales, cinemática, migración, entrapamiento, Cuenca Golfo San Jorge*

ABSTRACT

Extensional fault system characterization using displacement profiles and maps: Examples from the Golfo San Jorge Basin

Displacement profiles and maps were used in the subsurface of the Golfo San Jorge Basin in the Manantiales Behr region to analyze the factors affecting fault growth and propagation, the kinematic evolution of the extensional system and the migration and trapping of hydrocarbons. Two types of faults were recognized: faults that deform the basement and the sedimentary cover, and faults that involve only the sedimentary cover. The vertical growth of the faults within the sedimentary cover was restricted by lithologic variations and the intersection with the free surface. Faults involving the basement are syn-sedimentary and show D_{max}/L relationships and aspect ratios that allow the distinction between this type of faults and shallower fault planes. The geometric coherence shown in the aggregated displacement profile and map suggests a synchronous kinematic evolution of the faults in the sedimentary cover. The relationship between the observed fault sizes could be indicative of an early linkage of fault segments and a later increase of throw. Reactivation of the pre-existent basement fabric had little influence on the development of faulting in the sedimentary cover because the Pozo D-129 Formation acted as a structural decoupling level. The low degree of connection between the shallow and deep fault zones disregards the hypothesis of hydrocarbon charge from a local deep kitchen. The mapping of fault segments with higher values of displacement and the recognition of transfer zones may help to locate and delineate hydrocarbon traps in the footwall blocks.

Keywords: *Normal faults, kinematic, migration, trapping, Golfo San Jorge Basin*

INTRODUCCIÓN

En el caso ideal de una falla normal aislada, de geometría plana y desarrollada en un medio elástico, isótropo y homogéneo, los contornos de iguales valores del desplazamiento proyectados sobre un

plano vertical y paralelo al rumbo de la falla tendrán la forma de elipses concéntricas centradas en el punto de máximo desplazamiento (Fig. 1a y b) y con valores tendientes a cero en los bordes (Barnett *et al.* 1987, Walsh y Watterson 1987). El perfil de desplazamiento de un estrato atra-

vesado por una falla de este tipo mostrará un máximo en la parte media y pendientes tendientes a cero en las terminaciones (Fig. 1c).

Los mapas de desplazamiento para superficies de fallas que ocurren en la naturaleza también pueden mostrar diseños

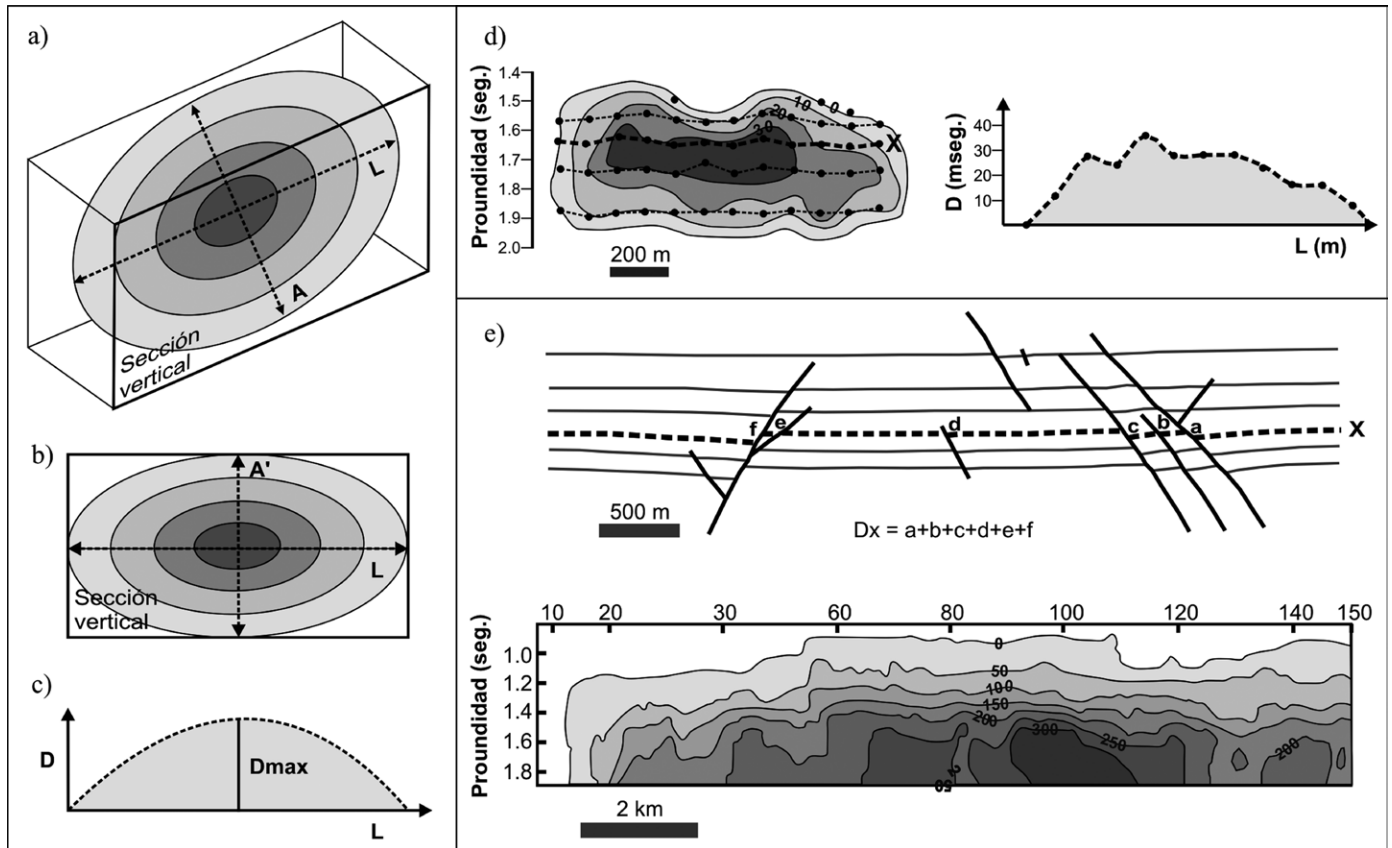


Figura 1: a) Diagrama que ilustra la distribución del desplazamiento (D) en una superficie de falla de longitud L y alto A (la densidad del sombreado indica aumento del desplazamiento hacia el centro de la falla); b) Mapa de desplazamiento (A' se aproxima a la altura de la falla); c) Perfil de desplazamiento (D_{max} : desplazamiento máximo); d) Mapa y perfil de desplazamiento de una falla normal del Mar del Norte (elaboración propia con datos de Barrett *et al.* 1987); e) Mapa de desplazamiento agregado y corte estructural esquemático ilustrando la metodología de cálculo del desplazamiento total del horizonte X (D_x) (modificado de Walsh y Watterson 1991).

de elipses que rodean la zona de máximo desplazamiento. Los gráficos de desplazamiento correspondientes presentarán un sector central con altos valores (Fig. 1d), los cuales decrecen gradualmente hasta cero en los extremos (Barnett *et al.* 1987). Cuando el crecimiento de una falla es perturbado por la intersección o acercamiento a otra superficie de falla, la superficie del terreno o el contacto con rocas más incompetentes, las terminaciones de las elipses adquieren formas irregulares con mayores gradientes de desplazamiento en las cercanías del elemento confinante (Nicol *et al.* 1996).

De manera similar a lo que sucede para una falla individual, en los sistemas de fallas extensionales cuyos elementos individuales crecieron en forma sincrónica se verifica que los mapas y perfiles que representan la distribución de la suma de los desplazamientos individuales (despla-

zamiento agregado) presentan diseños regulares y sistemáticos incluso cuando no hay continuidad entre las superficies de falla (Fig. 1e). Esta característica es consecuencia del alto grado de coherencia geométrica y movimiento sincrónico de las fallas del sistema, en oposición a un desarrollo secuencial de los elementos individuales (Walsh y Watterson 1991).

En cuanto a los mecanismos de crecimiento de las fallas y sistemas de fallas normales, se diferencian dos modelos principales: crecimiento por propagación radial (o axial) y crecimiento por conexión de segmentos de falla (Cartwright *et al.* 1995). En el primero de los casos (Fig. 2a), la progresión en los valores de longitud de la falla (L) y desplazamiento máximo (D_{max}) es continua a lo largo del tiempo y sigue una relación lineal o exponencial (Cartwright *et al.* 1995, Kim y Sanderson 2005). En cambio, cuando el crecien-

to se produce a través de la conexión de segmentos de falla adyacentes, la nueva falla tendrá un alto valor de longitud y poco desplazamiento asociado (Fig. 2b y c). Luego, el sistema puede crecer mediante la acumulación de desplazamiento en la falla conectada, generando de este modo un patrón escalonado en los gráficos D_{max}/L (Cartwright *et al.* 1995, Walsh *et al.* 2002).

Numerosos trabajos basados en datos de superficie y subsuelo han demostrado que la distribución del desplazamiento de las fallas normales y sistemas de falla extensionales que ocurren en la naturaleza, así como las relaciones entre la longitud y el rechazo, se aproximan a los patrones antes mencionados y por tanto son susceptibles de ser analizados utilizando este tipo de representaciones (Barnett *et al.* 1987, Bouvier *et al.* 1989, Baudon y Cartwright 2008). El objetivo de este trabajo es ilus-

trar la aplicación de esta técnica para contribuir al entendimiento de las características geométricas y la evolución cinemática de un grupo de fallas normales que afectan al Cretácico de la región de Manantiales Behr. Adicionalmente, los resultados derivados de este análisis han sido aplicados a la evaluación de las trayectorias de migración de los hidrocarburos y la identificación de trampas de hidrocarburos en el bloque alto de las fallas.

MARCO GEOLÓGICO

La región de Manantiales Behr se localiza en el flanco norte de Cuenca del Golfo San Jorge a 50 km de la ciudad de Comodoro Rivadavia, provincia de Chubut (Fig. 3a).

En este sector se observa la presencia de una zona de engrosamiento de los depósitos de los grupos Las Heras y Chubut conocida como depocentro Granson (Jalfin *et al.* 2002). La misma limita hacia el norte y sur con los sistemas de fallas de El Alba y Escalante respectivamente (Fig. 3b), en tanto que hacia el este limita con el Alto de Voster (Vergés *et al.* 2001). Hacia el oeste el depocentro continúa su desarrollo fuera de la zona de estudio.

Estratigrafía

La columna sedimentaria en este sector de la Cuenca del Golfo San Jorge (Fig. 4b) descansa sobre un basamento económico y sísmico que, según datos de perforaciones y afloramientos situados fuera de la zona de estudio, estaría constituido por gneises y migmatitas paleozoicas (Lesta *et al.* 1980) y depósitos volcanoclásticos de edad jurásica asignados al Grupo Lonco Trapial (Lesta y Ferello 1972).

En relación de no-concordancia apoyan sobre este basamento los depósitos del Grupo Las Heras (Lesta *et al.* 1980), informalmente denominado "Neocomiano", del Jurásico Superior-Cretácico Inferior (Uliana y Legarreta 1999). El mismo está conformado por una sucesión epiclástica cuya distribución irregular de espesores está controlada por la actividad de fallas sin-sedimentarias que involucran al basamento (Fitzgerald *et al.* 1990).

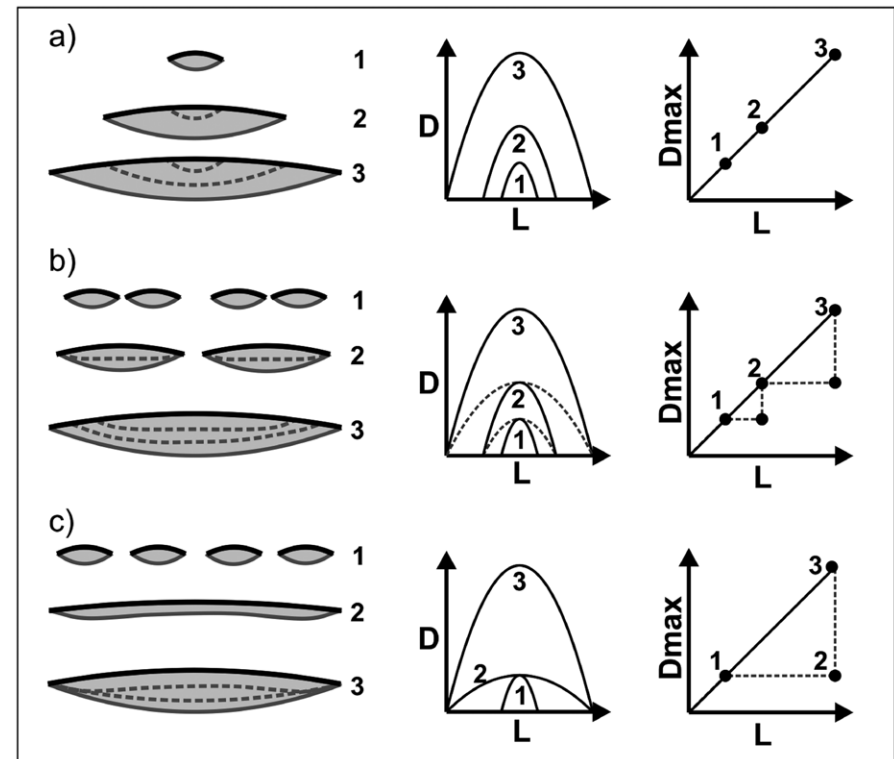


Figura 2: Modelos esquemáticos de evolución cinemática de sistemas de fallas normales y gráficos de desplazamiento asociados: a) Crecimiento por propagación radial; b) Crecimiento por conexión de segmentos de falla adyacentes; c) Crecimiento por conexión temprana de segmentos de fallas.

Continúan por encima los depósitos de edad cretácica tardía del Grupo Chubut (Lesta 1968) en relación de discordancia angular suave o paraconcordancia con el Grupo Las Heras o unidades más antiguas (Figari *et al.* 1999). Estos estratos constituyen el relleno principal de la cuenca y están representados por secuencias continentales lacustres y fluviales con participación de rocas piroclásticas (Feruglio 1950). El tercio inicial del grupo comprende a los depósitos de la Formación Pozo D-129 (Barremiano-Aptiano; Hechem *et al.* 1987), principal roca generadora de la cuenca. Por encima, las Formaciones Mina del Carmen (Albiano, Figari *et al.* 1999), Comodoro Rivadavia (Cenomaniano-Coniaciano, Fitzgerald *et al.* 1990) y Yacimiento El Trébol (Coniaciano tardío-Maastrichtiano, Bonaparte y Gasparini 1978) alojan a los principales niveles de roca reservorio y roca sello (Fig. 4b).

La columna estratigráfica de la cuenca se completa con rocas del Cenozoico, representado por las Formaciones Salamanca, Río Chico, Sarmiento, Chenque, Santa

Cruz y sus equivalentes laterales. Las mismas conforman un relleno volcanoclástico de grano fino en el cual se identifican dos pulsos de inundación marina provenientes del océano Atlántico (Legarreta y Uliana 1994). En este grupo de rocas se incluyen también una serie de basaltos alcalinos y cuerpos ígneos hipabisales de edad oligocena-miocena (Figs. 4b y 5) y amplia distribución en la zona (Ferello 1969, Ardolino *et al.* 1999). El registro se completa con los Rodados Patagónicos del Plioceno tardío-Pleistoceno.

Estructura

El estilo estructural del área está representado por fallas normales de rumbo ONO-ESE, E-O y ENE-OSO (Fig. 4a), que muestran un arreglo escalonado con un claro predominio de fallas que inclinan en dirección norte (Jalfin *et al.* 2002). En secciones sísmicas de orientación N-S, las trazas de las fallas son de geometría plana o ligeramente cóncava hacia arriba con inclinaciones de entre 50° y 70° (Fig. 4b). Hacia el sector oriental de la zona de es-

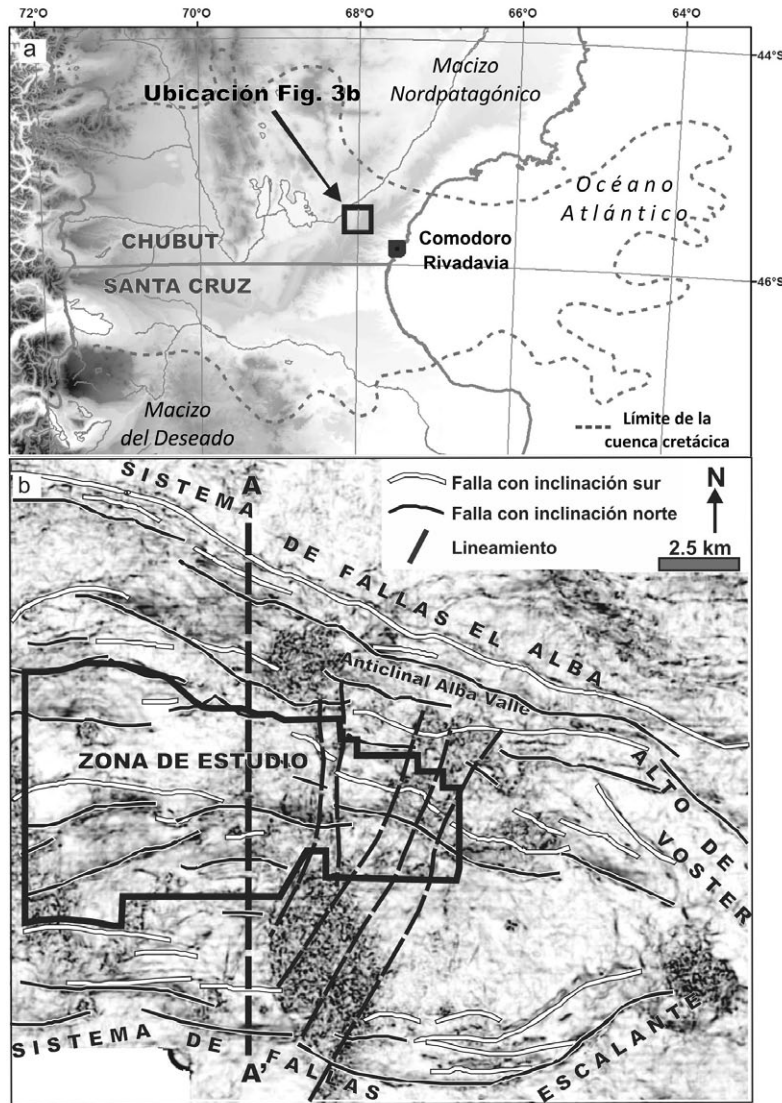


Figura 3: Ubicación geográfica y tectónica de la zona de estudio: a) Mapa de relieve topográfico que indica la localización del área analizada dentro de la cuenca del Golfo San Jorge; b) Superficie paralela al techo de la formación Comodoro Rivadavia extraída del cubo sísmico de coherencia.

tudio se observan una serie de lineamientos sub-verticales de rumbo N-S a NE-SO con escaso o nulo rechazo vertical (Fig. 5). Estos lineamientos constituyen discontinuidades que atraviesan toda la columna sedimentaria y aparecen conectando sectores circulares de muy baja relación señal-ruido que se interpretan asociados a intrusiones ígneas (Fig. 5a). La abundancia de reflectores sísmicos de alta amplitud, discordantes o concordantes con la estratificación y situados en las cercanías de estos lineamientos (Fig. 5b), permite especular que los mismos serían los conductos de alimentación magmática de los intrusivos.

METODOLOGÍA EMPLEADA

La metodología empleada en este trabajo, aplicable a un gran número de situaciones equivalentes, consistió en la interpretación de horizontes y fallas en secciones sísmicas 3D perpendiculares o ligeramente oblicuas a las trazas de las fallas. En este caso, se interpretaron un total de 18 fallas normales distribuidas en una superficie de 80 km² (Fig. 4a) y fueron mapeados en el dominio del tiempo seis horizontes cercanos al techo de los reflectores correspondientes al basamento, al Grupo Las Heras y a las Formaciones Pozo D-129,

Mina del Carmen, Comodoro Rivadavia y Yacimiento El Trébol (Fig. 4b).

Con esta información de base, es posible marcar en las secciones sísmicas la posición de los contactos de las fallas con los niveles situados en los bloques alto y bajo y obtener la posición en el espacio de estos puntos. Estos datos se pueden utilizar para: 1) calcular la distancia medida en planta desde el extremo de la traza de falla hasta la posición del contacto de un horizonte sísmico en el bloque alto; 2) obtener el rechazo vertical aparente del nivel seleccionado mediante la diferencia entre las profundidades de los contactos de bloque alto y bajo; y 3) capturar la posición en profundidad del rechazo vertical calculado, referida al bloque alto de la falla. Debido a que se ha trabajado con secciones sísmicas en tiempo, los datos de los puntos 2) y 3) están expresados en unidades de tiempo doble.

De este modo es posible representar en un gráfico la variación del rechazo de un horizonte cualquiera en función de la distancia desde el extremo de la traza de la falla (perfil de desplazamiento; Fig. 1c y d); y construir los contornos de isodesplazamiento para la superficie de falla volcando los datos de rechazo vertical aparente de todos los horizontes en un mapa que represente la proyección de los mismos sobre un plano vertical paralelo al rumbo de la falla (mapa de desplazamiento; Fig. 1) (Barnett *et al.* 1987, Walsh y Watterson 1991, Childs *et al.* 1995, Willemse *et al.* 1996).

RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados del análisis de los valores de longitud de traza y desplazamiento de 18 fallas normales que atraviesan a la Formación Comodoro Rivadavia dentro de la zona de estudio (Fig. 4a). Entre las mismas hay 6 fallas principales que se estudiaron con mayor detalle utilizando mapas de desplazamiento (fallas 1-6; Fig. 6) Este análisis permitió diferenciar dos grupos: 1) fallas que afectan al basamento y a la cobertura sedimentaria (fallas 1, 2 y 5; Fig. 6a); y 2) fallas que se desarrollan integra-

mente en el Grupo Chubut y no alcanzan al basamento (fallas 3, 4 y 6; Fig. 6b). La longitud, altura y valores de rechazo vertical de los segmentos de falla que afectan al basamento (fallas 1, 2 y 5; Fig. 6a) fueron calculados e incorporados al análisis para la comparación con los tramos de falla poco profundos.

Tamaño y desplazamiento de las fallas

De las fallas que se desarrollan dentro del Grupo Chubut, los valores máximos de desplazamiento se ubican en general hacia el techo de la Formación Comodoro Rivadavia (Fig. 6). El gráfico D_{max}/L correspondiente a las fallas interpretadas que atraviesan esta unidad permite reunir las en tres grupos (grupos 1 a 3, Fig. 7a y b): 1) fallas con valores bajos de longitud y desplazamiento (promedios de 900 m y 29 mseg respectivamente); 2) dos fallas relativamente largas (3,4 y 4,9 km de longitud) que presentan valores de desplazamiento proporcionalmente bajos (46 y 42 mseg de rechazo vertical aparente); y 3) fallas de gran longitud con altos valores de rechazo (promedios de 4,7 km de longitud y 88 mseg de rechazo vertical aparente).

Este agrupamiento también puede observarse presentando todos los perfiles de desplazamiento en un mismo gráfico y situando el origen del eje de longitud de falla en la parte media de las trazas (Fig. 7b). Este gráfico permite reconocer la forma general del perfil de desplazamiento de cada uno de estos grupos a pesar de la dispersión en los valores individuales. De este modo se observa en forma cualitativa que la parte media de los grupos 1 y 2 tienen rechazos verticales máximos similares y que la extensión de las trazas de falla de los grupos 2 y 3 es alrededor de cuatro veces la longitud de las fallas más pequeñas. Estas relaciones podrían representar diferentes estadios de evolución de las fallas dentro del Grupo Chubut (comparar la figura 7b con la figura 2c), siendo las fallas más pequeñas aquellas que se habrían generado durante la etapa inicial de nucleamiento y propagación lateral, mientras que las fallas de mayor tamaño representarían un estadio de mayor madurez

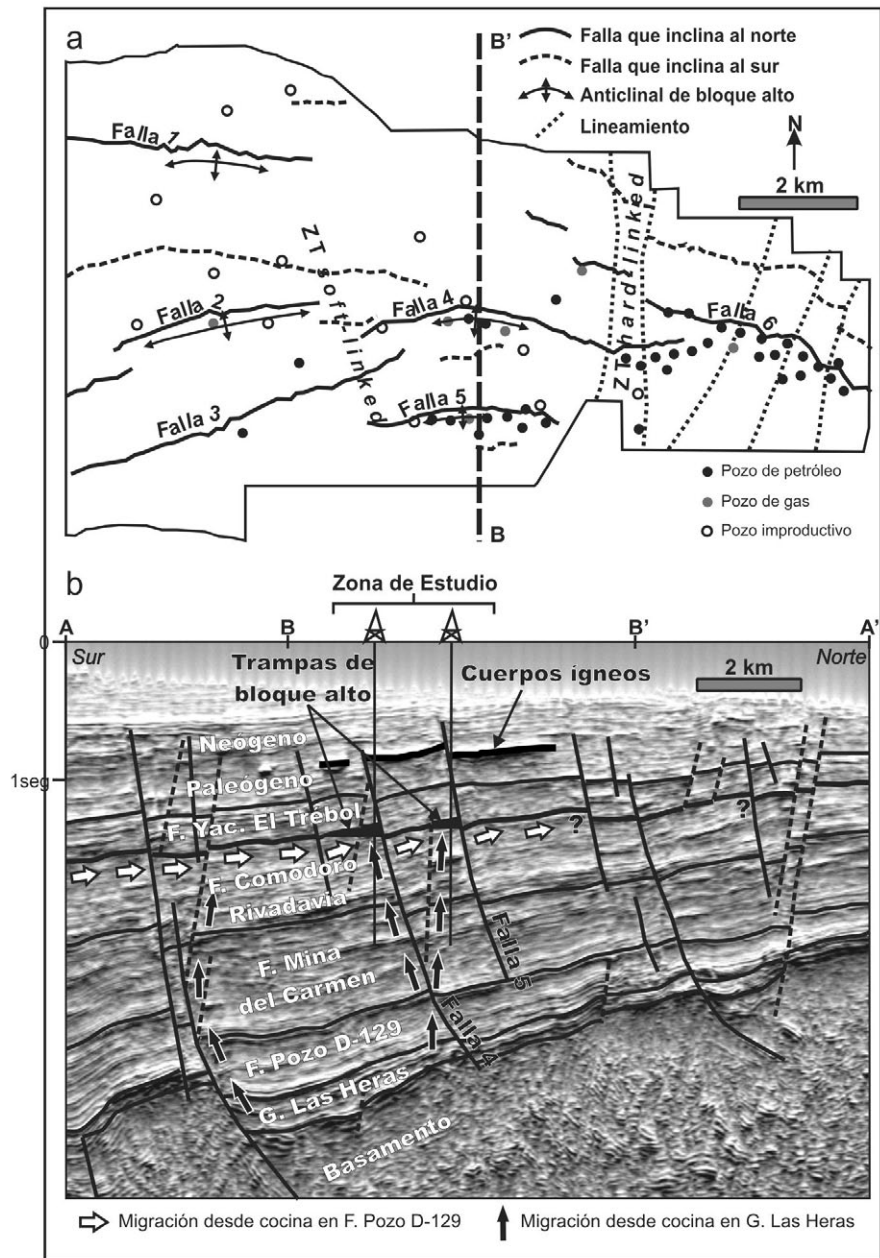


Figura 4: Arreglo estratigráfico y estructural de la zona de estudio: a) Trazas de fallas normales y lineamientos que cortan el techo de la formación Comodoro Rivadavia y su relación con los pozos perforados en el área (ZT: zona de transferencia); b) Sección sísmica representativa ilustrando la geometría del relleno sedimentario y del sistema de fallas, y las posibles trayectorias de migración de los hidrocarburos.

producto de la interacción y conexión lateral de segmentos de falla individuales. En cuanto a la distribución espacial de estos grupos, las fallas más evolucionadas se ubican hacia la mitad occidental de la zona de estudio, mientras que la mayoría de las fallas de menor longitud y/o rechazo vertical se ubican dentro del sector atravesado por los lineamientos transversales (Fig. 4a). Esta distribución se podría deber a que la extensión regional en la mitad

oriental estaría acomodada por estructuras mayores situadas fuera del área de estudio, como el anticlinal Alba Valle (Fig. 3b), localizado a tres kilómetros en dirección norte (Uranga *et al.* 2011). Otra posibilidad sería que los lineamientos mencionados hayan interferido en la propagación y conexión lateral de las fallas, acomodando parte de la extensión mediante desplazamiento de rumbo o extensión oblicua. Las longitudes y desplazamiento de las

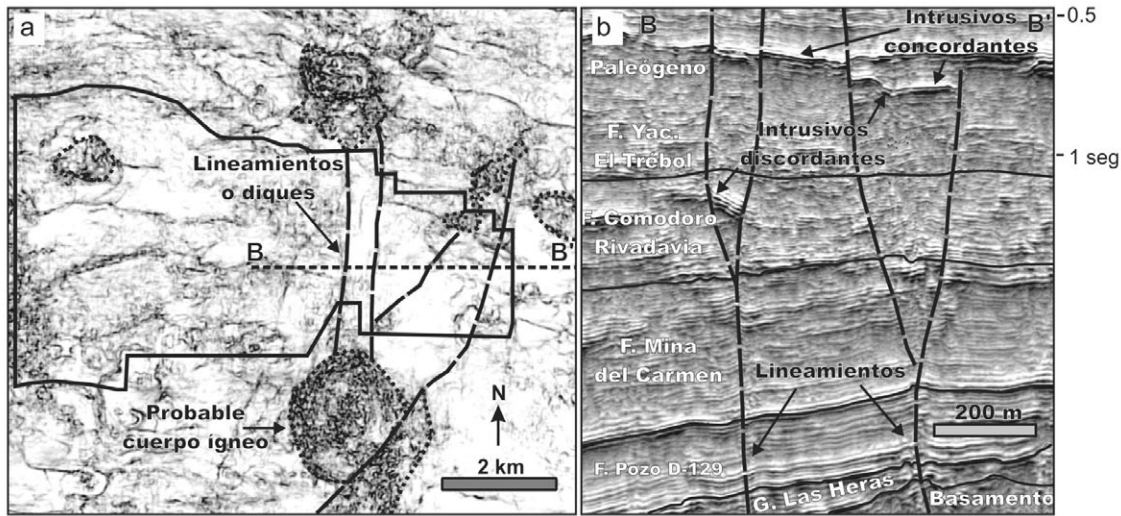
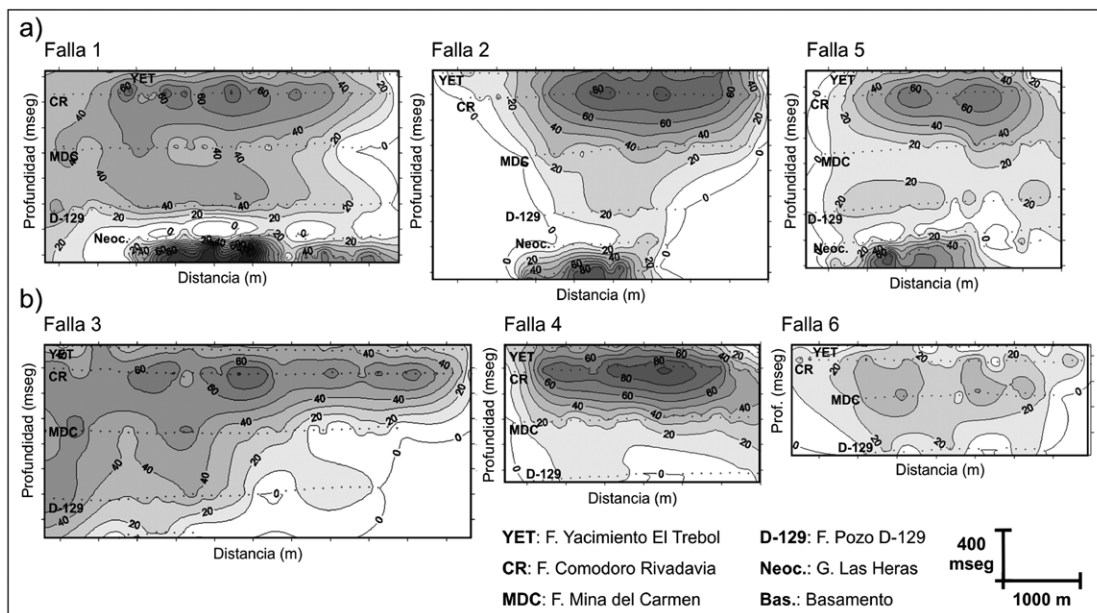


Figura 5: Cuerpos ígneos y lineamientos asociados: a) Sección horizontal del cubo sísmico de coherencia a 0,65 segundos, cercano al Paleógeno; b) Sección sísmica O-E con la ubicación de los lineamientos N-S y NNE-SSO y de los intrusivos concordantes y discordantes.



superficies de fallas que atraviesan al basamento y al Grupo Las Heras se han analizado en los tramos profundos de las fallas 1, 2 y 5 (Figs. 6a y 8a) debido a que presentan un patrón de desplazamiento diferente al observado en las fallas que afectan al Grupo Chubut. En relación a estas últimas, las fallas de basamento muestran una relación D_{max}/L más elevada (Fig. 7a) porque alcanzan valores máximos de rechazo vertical de igual magnitud o superior a los registrados dentro del Grupo Chubut (entre 73 y 147 msec) pero a lo largo de fallas de menor extensión (entre 1,3 y 3,2 km). Estas diferencias entre los tramos someros y profundos se pueden atribuir a que se

trata de fallas de distinta edad formadas en sustratos litológicamente diferentes.

Distribución del desplazamiento

A nivel del Grupo Chubut, el diseño de los contornos de desplazamiento de las fallas tiene formas que se aproximan a elipses centradas en el techo de la Formación Comodoro Rivadavia (Fig. 6). La presencia de varios máximos en el centro de las elipses y la forma irregular de los contornos hacia las terminaciones laterales de las fallas serían indicativos de fallas maduras que se han formado por la conexión lateral de varios segmentos individuales (Nicol *et al.* 1996).

Los ejes mayores de las elipses están orien-

tados de forma paralela a la estratificación y arrojan una relación de aspecto promedio de 2,8 (cociente entre la longitud y ancho de las fallas; Fig.7c) lo que indicaría condiciones de crecimiento restringidas en la dirección de inclinación de las fallas (Nicol *et al.* 1996). En efecto, en las vecindades de los contactos con las Formaciones Mina del Carmen y Pozo D-129, los cambios en las propiedades mecánicas derivadas de la variación litológica podrían haber restringido el crecimiento de estas fallas en profundidad (Fig. 6). Hacia arriba, las terminaciones superiores no están claramente definidas debido a la falta de horizontes interpretados dentro del Cenozoico. A pesar de esto, la disposición

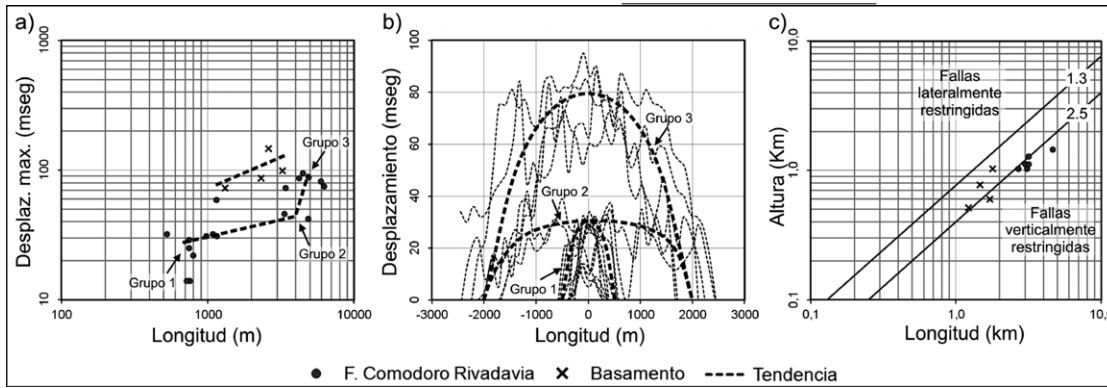


Figura 7: a) Gráfico D_{max}/L de las fallas analizadas; b) Perfiles de desplazamiento del techo de la Formación Comodoro Rivadavia; c) Gráfico de longitud versus altura de los tramos someros y profundos de las fallas principales (1 km equivale a 571 mseg). Las líneas rectas muestran relaciones de aspecto de 1,3 y 2,5 (modificado de Nicol *et al.* 1996).

horizontal de los contornos de isodesplazamiento y el menor espaciado entre los mismos podrían indicar que se trata de una sucesión de sincrecimiento que se habría acumulado luego de la depositación de la Formación Comodoro Rivadavia (Fig. 6) (Childs *et al.* 2003). Esta última característica podría estar relacionada a la presencia de fallas de crecimiento en afloramientos de la Formación Salamanca situados en el flanco norte de la Cuenca del Golfo San Jorge (Foix *et al.* 2012).

La falla 6 escapa de este patrón general porque presenta bajos valores de rechazo vertical con líneas de contorno irregulares y centradas en dos máximos desarrollados en la Formación Mina del Carmen (Fig. 6b). Este diseño sería asimilable al de una falla ciega formada por la conexión lateral de al menos dos segmentos de falla de forma circular que se habrían propagado en la secuencia sedimentaria sin alcanzar la superficie del terreno.

Las contornos de isodesplazamiento de los tramos profundos de las fallas 1, 2 y 5 (Fig. 6a) tienen la forma de semielipses con una relación de aspecto promedio de 2,2. Este valor es consecuencia de la forma elongada de las fallas en dirección paralela a la estratificación y la presencia de condiciones de crecimiento restringida evidenciadas por los fuertes gradientes de rechazo vertical en las terminaciones laterales y superiores (Nicol *et al.* 1996). La disminución del desplazamiento hacia el techo del Grupo Las Heras y la posición subhorizontal de los contornos es consistente con el carácter sinsedimentario de estas fallas (Childs *et al.* 2003), claramente evidenciado por el aumento de espesor de

la secuencia de crecimiento en el bloque bajo de las mismas (Fitzgerald *et al.* 1990) tal como se observa en la figura 4b. Por otro lado, los altos gradientes en las terminaciones laterales podrían indicar que los bordes permanecieron estáticos o se propagaron poco durante el crecimiento de la falla (Childs *et al.* 2003).

Los perfiles de desplazamiento (Fig. 8) muestran una zona central de valores máximos poco variables y tramos laterales con pendientes hacia las terminaciones de las fallas. La comparación de las formas de las curvas correspondientes a la Formación Comodoro Rivadavia y al basamento en las fallas 1, 2 y 5 (Fig. 8a) revela que existen diferencias significativas entre los tramos someros y profundos.

Las pendientes de las terminaciones laterales en los perfiles de desplazamiento que afectan a la Formación Comodoro Rivadavia son suaves e indicativas de condiciones de crecimiento lateral poco restringidas (Nicol *et al.* 1996). La excepción corresponde a las terminaciones este y oeste de las fallas 2 y 4, muestran gradientes elevados producto de la interferencia entre los campos de deformación elástica respectivos (Nicol *et al.* 1996). En efecto, como consecuencia de la transferencia de desplazamiento entre ambas fallas se desarrolla una rampa de relevo (Fig. 4a) atravesada por una falla de menor tamaño (Childs *et al.* 1995).

El perfil de la falla 3 muestra poca variación en los valores de rechazo vertical dentro de la Formación Comodoro Rivadavia (Fig. 8b) debido posiblemente a la existencia de una componente de rumbo en el desplazamiento de la misma. A di-

ferencia de lo que se observa en las otras fallas vecinas, la falla 3 carece de los típicos anticlinales longitudinales que se forman en los bloques altos de las fallas extensionales (Schlische 1995), lo que sería una evidencia adicional de la ausencia de desplazamiento ortogonal puro (Fig. 4a). La falla 6 muestra dos tramos separados por un mínimo que puede corresponder a una zona de conexión entre segmentos de falla individuales (Childs *et al.* 1995). Las fallas de basamento presentan en todos los casos gradientes de desplazamiento elevados en las terminaciones (fallas 1, 2 y 5; Fig. 8a). Los mismos se habrían generado por la interferencia entre segmentos de falla adyacentes (falla 1) o como resultado del predominio de condiciones estáticas o de escasa propagación lateral durante la acumulación de las secuencias sin-sedimentarias (Childs *et al.* 2003).

Desplazamiento agregado

La sumatoria de los valores de desplazamiento de las fallas normales que afectan al Grupo Chubut a lo largo de secciones perpendiculares al rumbo general de las fallas permite visualizar la distribución de la extensión ocasionada por el campo de esfuerzo regional (Walsh y Watterson 1991).

El perfil de desplazamiento agregado para el techo de la Formación Comodoro Rivadavia (Fig. 9a) muestra tres sectores de forma simétrica con valores máximos en el centro y gradientes importantes en los extremos, análogo a lo observado en las fallas individuales. Estos sectores están separados por zonas de transferencia (ZT) en las cuales el déficit de despla-

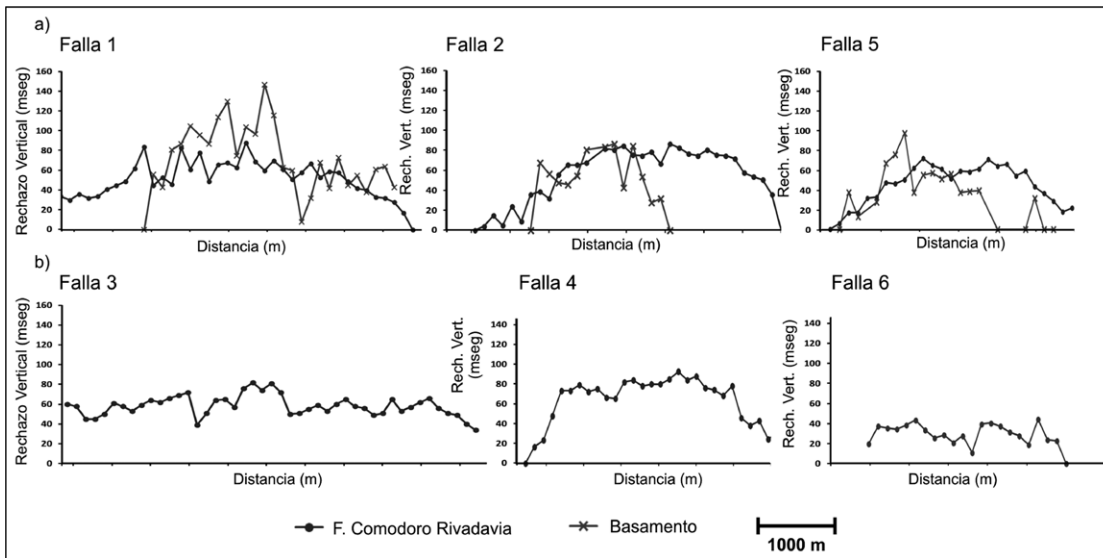


Figura 8: Perfiles de desplazamiento de las fallas principales (ubicación en Fig. 4a): a) Fallas con un tramo profundo que involucra al basamento; b) fallas que se desarrollan dentro de la cobertura sedimentaria.

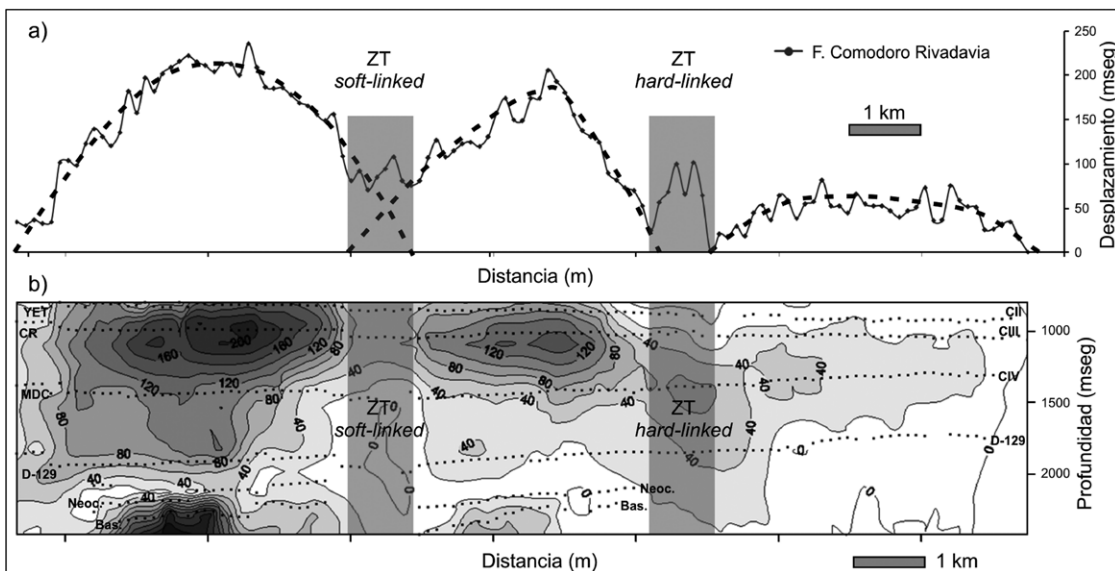


Figura 9: Perfil (a) y mapa de desplazamiento agregado (b) del techo de la Formación Comodoro Rivadavia para el sistema de fallas analizado en este trabajo (contornos cada 10 mseg); ZT: zona de transferencia. Ver figura 6 para las referencias estratigráficas.

miento se acomoda mediante plegamiento y fracturación de los estratos situados hacia las terminaciones de las fallas (Walsh y Watterson 1991, Childs *et al.* 1995). La ZT situada hacia el sector occidental de la zona de estudio se presenta como una faja difusa de fallas con solapamientos, ligeramente oblicua el rumbo de las mismas y con desarrollo de rampas de relevo (fallas *soft-linked*: la continuidad mecánica y geométrica entre las superficies de fallas adyacentes se produce por la deformación dúctil del volumen de roca existente entre las mismas; Walsh y Watterson 1991). En cambio, en el sector oriental las zonas con bajos valores de rechazo coinciden con

la ocurrencia de lineamientos de orientación N-S y NNE-SSO, los cuales probablemente acomodaron el estiramiento mediante desplazamiento de rumbo y extensión oblicua, facilitando la intrusión de cuerpos ígneos (Fig. 5) en la columna sedimentaria (fallas *hard-linked*: las superficies de fallas adyacentes están conectadas a la escala del mapa de referencia; Walsh y Watterson 1991). El mapa de desplazamiento agregado (Fig. 9b) ilustra las ZT y muestra que existen dos grupos de fallas bien diferenciados que se desarrollan en niveles estratigráficos diferentes: fallas profundas con valores máximos de desplazamiento en

el basamento y fallas someras desarrolladas dentro del Grupo Chubut y en la secuencia cenozoica, con valores máximos de desplazamiento hacia el techo de la Formación Comodoro Rivadavia. Entre ambos grupos de fallas se extiende la Formación Pozo D-129, compuesta por rocas de grano fino y comportamiento mecánico dúctil que podría constituir un nivel de desacople estructural (Higgins y Harris 1997). La coherencia geométrica observada tanto en el perfil como en el mapa de desplazamiento agregado, caracterizada por diseños regulares y sistemáticos, indicaría una evolución cinemática sincrónica del

sistema de fallas, en oposición a un modelo de evolución secuencial para cada uno de los elementos individuales (Walsh y Watterson 1991).

DISCUSIÓN

Relación entre las fallas de basamento y las fallas de cobertura sedimentaria

Las fallas extensionales que involucran al basamento y controlan la distribución de espesores de los estratos del Grupo Las Heras, 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.

Estas fallas profundas tienen un cociente D_{max}/L y una relación de aspecto que las diferencia de las fallas someras (Fig. 7a y c) y permite caracterizarlas cuando las variaciones de espesores entre el bloque alto y bajo es escasa o, más comúnmente, cuando el contacto entre el Grupo Las Heras y las unidades subyacentes presenta poco contraste de impedancias acústicas en las secciones sísmicas. Por otro lado, la poca conexión con los tramos más superficiales observadas en los mapas de desplazamiento, tanto para las fallas individuales como para el arreglo extensional en conjunto (Figs. 6a y 9b), sugieren que la reactivación de la fábrica estructural preexistente habría tenido poco control en la evolución de las fallas someras, limitándose a influenciar la posición de los centros de nucleación sobre la continuación hacia arriba de las fallas de basamento (Higgins y Harris 1997).

Estas características se pueden atribuir a la existencia de una zona de desacople estructural desarrollada dentro de las rocas de grano fino y comportamiento dúctil de la Formación Pozo D-129. Modelos análogos que analizan la deformación extensional de la cobertura sedimentaria situada por encima de un basamento con una fábrica estructural previa, muestran que ante la existencia de una capa dúctil que los separa, las estructuras en la cobertura pueden aparecer espacialmente no relacionadas y geométricamente in-

dependientes de las fallas del basamento (Higgins y Harris 1997). En estos casos, la influencia de las estructuras preexistentes estaría restringida a las áreas situadas directamente por encima de las mismas, mientras que la deformación en la cobertura es más uniforme con arreglos de fallas que tienden a estar orientados en forma perpendicular a la dirección de extensión (Higgins y Harris 1997).

Evolución cinemática y edad de las estructuras

Las fallas profundas de basamento se formaron durante la etapa de *rift* de edad neocomiana que afectó en diverso grado a amplios sectores de la Cuenca del Golfo San Jorge (Fitzgerald *et al.* 1990). Los mapas y perfiles de desplazamiento muestran que las características de las terminaciones laterales y superiores son coherentes con un modelo de falla de crecimiento sin-sedimentario. Dentro del área de estudio, estas fallas habrían permanecido inactivas durante la depositación de la mayor parte del Grupo Chubut y, como fuera mencionado anteriormente, se interpreta que la reactivación de las discontinuidades del basamento durante la formación de las fallas en la cobertura sedimentaria habría sido de poca magnitud y confinada a los niveles dúctiles de la Formación Pozo D-129.

El sistema de fallas que se desarrolla en la cobertura sedimentaria se habría iniciado durante el Cretácico, luego de la depositación de la Formación Comodoro Rivadavia, ya que los centros de máximo desplazamiento se ubican hacia el techo de esta unidad (Walsh y Watterson 1987) (Fig. 6). Dado que la mayoría de las fallas se inician y propagan en subsuelo antes de alcanzar la superficie del terreno (Baudon y Cartwright 2008), puede suponerse que el evento extensional que da origen a este sistema de fallas se habría iniciado en profundidad en forma más o menos contemporánea a la depositación de la Formación Yacimiento El Trébol y continuado durante el Cenozoico, controlando en parte la acumulación de las unidades del Paleoceno (Foix *et al.* 2012).

Hacia el sudoeste del área analizada, en

dirección al centro de la cuenca cretácica, se ha reconocido la existencia de actividad extensional durante la depositación de las Formaciones Pozo D-129 y Mina del Carmen (Cayo *et al.* 2011). Este evento puede reconocerse en las variaciones de espesor que se observan en las zonas afectadas por los sistemas de fallas El Alba y Escalante (Figs. 3b y 4b) situados al sur y norte respectivamente del área analizada en este trabajo. En este contexto, se puede interpretar que en el área de estudio durante la depositación de la Formación Mina del Carmen las estructuras del basamento fueron reactivadas sobre los lineamientos antes mencionados, mientras el bloque intermedio habría rotado pasivamente, sin evidenciar deformación interna significativa.

En cuanto al mecanismo de crecimiento lateral de las fallas, la ausencia de términos intermedios en las relaciones D_{max}/L y en los perfiles de desplazamiento observados en los gráficos de la figuras 7a y b respectivamente, permite suponer un modelo de conexión de segmentos individuales antes que un esquema de crecimiento por propagación radial, ya que este último daría lugar a un rango completo de tamaños de falla (Fig. 2a). Si a lo anterior le agregamos la observación de que la longitud de las fallas más largas corresponde a entre cuatro o cinco veces la longitud de las más pequeñas (Fig. 7a y b), podemos inferir también que estas últimas se habrían conectado tempranamente en la historia del sistema. Luego, las fallas más evolucionadas crecerían principalmente en desplazamiento propagándose poco en sus terminaciones laterales (comparar la figura 2c con la figura 7a y b). En la figura 10 se presenta un modelo conceptual sobre la evolución y modo de crecimiento en planta de las fallas nucleadas dentro del Grupo Chubut en el área de estudio. Un esquema similar ha sido propuesto en fallas normales asociadas a una fase extensional de edad paleocena reconocida en el flanco norte de la Cuenca del Golfo San Jorge (Foix *et al.* 2012).

La propagación secuencia abajo de las fallas normales dentro del Grupo Chubut habría estado controlada por los cam-

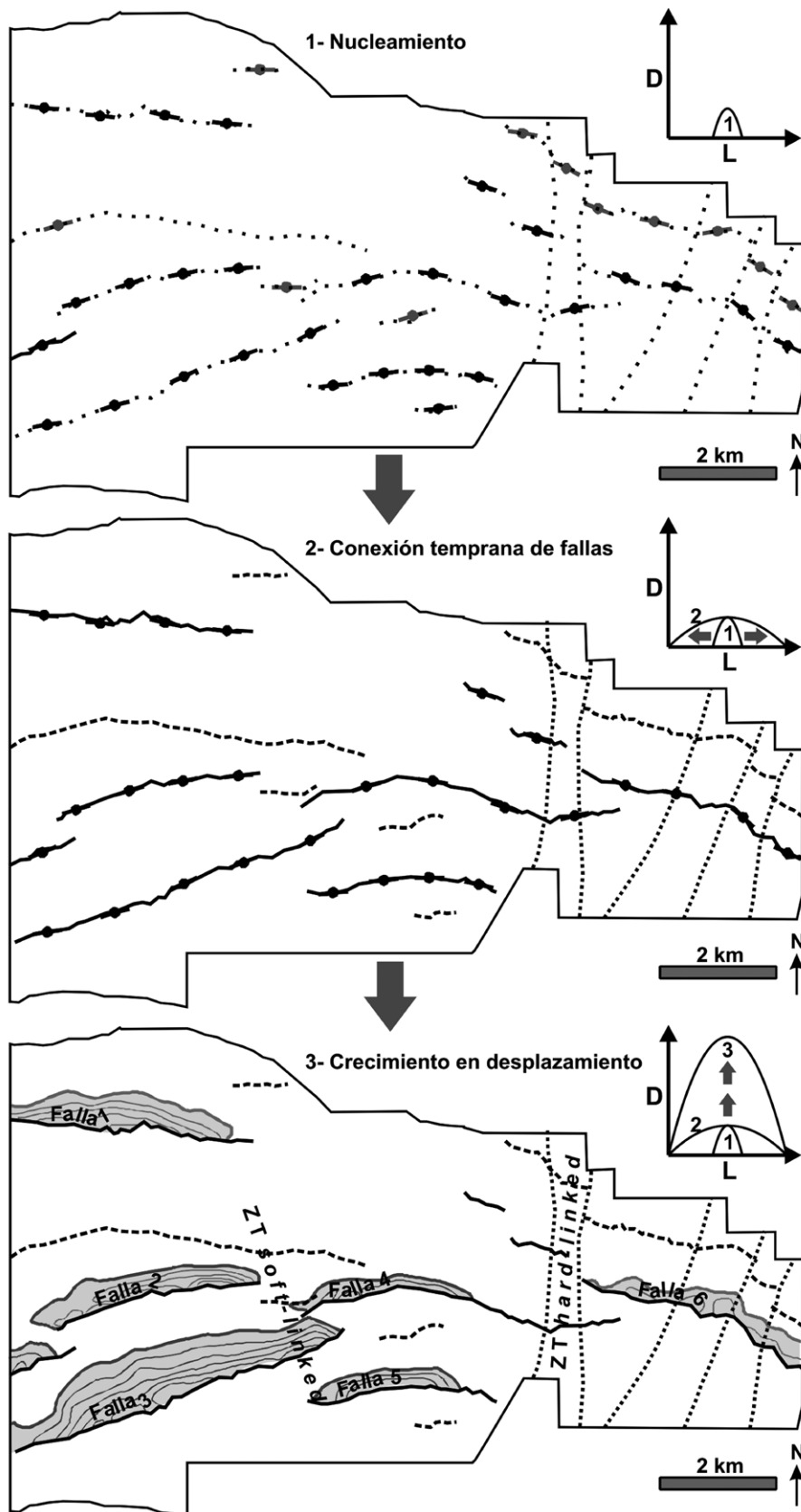


Figura 10: Modelo conceptual de evolución cinemática de las estructuras desarrolladas dentro del área de estudio. Referencias en la figura 4a.

bios de las propiedades mecánicas de la columna sedimentaria, frenando el crecimiento en profundidad hasta detenerse en los niveles dúctiles de la Formación Pozo D-129 (Figs. 6a y 9b). Hacia arriba se interpreta que la mayoría de estas fallas habrían alcanzado la superficie del terreno hacia el fin del Cretácico y/o inicios del Cenozoico.

La presencia de una serie de lineamientos de orientación N-S y NNO-SSE en el sector oriental del área de estudio pudo haber interferido en la propagación lateral y crecimiento en desplazamiento de las fallas situadas en la zona de influencia de los mismos (Fig. 10). Estos lineamientos podrían haberse formado por la reactivación y propagación hacia arriba de estructuras de basamento preexistentes o estar genéticamente relacionados al desarrollo de los pulsos de actividad magmática de edad oligocena-miocena (Ferello 1969, Ardolino *et al.* 1999). La coincidencia observada entre la ocurrencia de posibles zonas de transferencia y la intrusión de cuerpos ígneos sugiere que pudo haber existido algún grado de simultaneidad entre ambos procesos y que algunas de las fallas actuaron como conductos magmáticos (Fig. 5).

Migración y entrapamiento de los hidrocarburos

La coincidencia entre la ubicación de los yacimientos de la cuenca y la posición de los principales lineamientos estructurales ha llevado a que tradicionalmente se considere a la migración vertical a través de las zonas de falla como el mecanismo de migración más eficiente en la cuenca del Golfo San Jorge (Sciutto 1995, Rodríguez y Littke 2001).

El área analizada se sitúa en cercanías del borde de la cuenca, sector donde la Formación Pozo D-129 se ubica en facies proximales (según Merta 1974 en Figari *et al.* 1999), con bajo contenido de materia orgánica y poca madurez térmica, producto de la escasa profundidad de soterramiento (Jalfin *et al.* 2002, Bellosi *et al.* 2002). Otra fuente, en este caso de tipo hipotética, para los hidrocarburos del área serían los estratos con capacidad de contener materia orgánica del Grupo Las

Heras, los cuales al encontrarse a mayor profundidad habrían iniciado la generación de petróleo y gas a comienzos del Cenozoico y continuado hasta el Neógeno tardío (Jalfin *et al.* 2002).

La posibilidad de la existencia de vías de migración vertical a través de las fallas que conectarían a la potencial cocina del Grupo Las Heras con los niveles de reservorio del Grupo Chubut puede investigarse analizando los patrones de desplazamiento de las fallas que afectan al basamento y a la cobertura sedimentaria (Higgins y Harris 1997, Morley *et al.* 2007). Los mapas de desplazamiento realizados para las fallas asociadas con acumulaciones probadas o potenciales de hidrocarburos, muestran que no todas las fallas alcanzan la potencial roca madre neocomiana, y aquellas que lo hacen muestran un escaso o nulo grado de conectividad (Figs. 6a y 9b). Esto desfavorece la hipótesis de carga de las estructuras de bloque alto a través de las mismas fallas que forman las trampas. En consecuencia, los hidrocarburos presentes en el área de estudio habrían migrado lateralmente a lo largo de varios kilómetros desde las zonas de generación (Fig. 4b), posiblemente a través de los niveles permeables y relativamente continuos de la Formación Comodoro Rivadavia (Figari *et al.* 2002, Sylwan *et al.* 2008).

Respecto a las condiciones de entrapamiento de los hidrocarburos en la zona de estudio, la sección superior de la Formación Comodoro Rivadavia contiene los principales niveles de reservorios y también concentra los mayores valores de rechazo vertical de las fallas de cobertura (Fig. 6), las cuales al inclinar en dirección contraria a la pendiente regional (Fig. 4b) generan trampas de bloque alto y barreras a la circulación de los hidrocarburos por la yuxtaposición lateral de los niveles de reservorio con las rocas impermeables del bloque bajo (base de la Formación Yacimiento El Trébol; Jalfin *et al.* 2005). En el sector oriental de la zona analizada las trampas de bloque alto tienen una componente de sello lateral que se interpreta asociada a la presencia de diques ígneos que se emplazan en los lineamien-

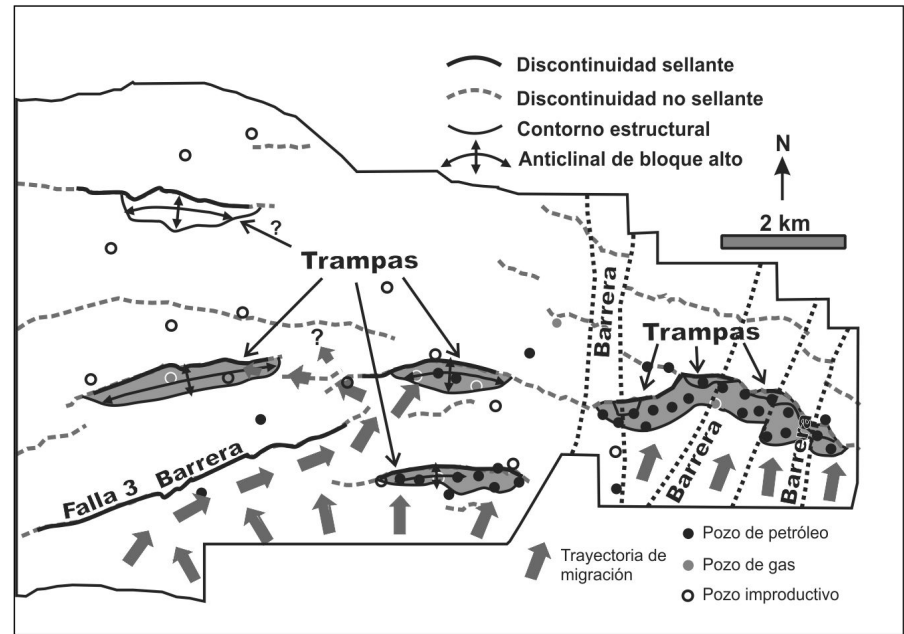


Figura 11: Identificación de las trampas de bloque alto y de las posibles trayectorias de migración de los hidrocarburos. Notar la ausencia de los pliegues anticlinales en el bloque alto de la falla 3.

tos de orientación N-S y NNO-SSE. Los mismos habrían actuado también como barreras a la migración de los hidrocarburos, dificultando la carga de las estructuras situadas hacia el oeste (Fig. 11).

La ubicación en el mapa de los tramos con mayores valores de rechazo vertical aparente para el techo de la Formación Comodoro Rivadavia, junto con la posición de los lineamientos que podrían actuar como barreras, permite delinear en forma cualitativa la localización y extensión de las trampas probadas o potenciales, y evaluar las posibles trayectorias de migración lateral de los hidrocarburos (Fig. 11).

CONCLUSIONES

La elaboración de perfiles y mapas de desplazamiento para fallas del subsuelo es una metodología rápida, sencilla y utiliza datos que es posible extraer de la interpretación sísmica básica y convencional, generalmente disponible en la mayoría de las cuencas sedimentarias con interés petrolero.

La inspección de los mapas de desplazamiento en el Cretácico del flanco norte de la Cuenca del Golfo San Jorge ha permitido reconocer dos tipos de fallas: 1) fallas

que afectan al basamento y a la cobertura sedimentaria, y 2) fallas que se desarrollan íntegramente en niveles estratigráficos del Grupo Chubut y por debajo de las cuales el basamento permanece sin deformar. Las superficies de las fallas que involucran al basamento y a la cobertura sedimentaria se agrupan en diferentes rangos de valores D_{max}/L y de relación de aspecto, lo cual permite diferenciarlas y asociarlas a fases tectónicas separadas.

Los contornos de isodesplazamiento de las superficies de falla que afectan al basamento y al Grupo Las Heras tienen la forma de semielipses con fuertes gradientes de rechazo vertical en las terminaciones superiores debido al carácter sin-sedimentario de las mismas, evidenciado además por el aumento de espesor de la secuencia de crecimiento en el bloque bajo. Las altas pendientes en los extremos de los perfiles de desplazamiento del basamento pueden ser indicativas de que las terminaciones laterales se mantuvieron estáticas o se propagaron poco durante la acumulación de los sedimentos.

Los mapas de desplazamiento de las superficies de falla que se desarrollan dentro del Grupo Chubut tienen formas que se aproximan a elipses centradas en el te-

cho de la Formación Comodoro Rivadavia. Los ejes mayores están orientados en forma paralela a la estratificación y las relaciones de aspecto elevadas indican condiciones de crecimiento restringidas en la dirección de inclinación de las fallas: hacia arriba por la conexión con la superficie libre del terreno (crecimiento sin-sedimentario) y hacia abajo por cambios en las propiedades mecánicas de las rocas.

El perfil de desplazamiento agregado para el techo de la Formación Comodoro Rivadavia muestra una notable coherencia geométrica que es indicativa de una evolución cinemática sincrónica para el sistema de fallas desarrollado en el Grupo Chubut. Por otro lado, el mapa de desplazamiento agregado revela escasa conexión física entre la fábrica del basamento y las fallas más modernas de la cobertura sedimentaria. Esto estaría asociado al comportamiento mecánico dúctil de la Formación Pozo D-129, que actuaría como nivel de desacople estructural.

Tanto el perfil como el mapa de desplazamiento agregado muestran zonas con bajos valores de rechazo vertical que corresponden a zonas de transferencia de tipo *soft-linked* y *hard-linked*. Estas últimas coinciden con la presencia de lineamientos de orientación N-S y NNE-SSO y la ocurrencia de cuerpos ígneos intruidos en la columna sedimentaria.

Las fallas de basamento sin-sedimentarias se formaron durante la etapa de *rift* de edad neocomiana y dentro de la zona de estudio ejercieron un control limitado en el desarrollo de las fallas de cobertura. Estas últimas se nuclearon y propagaron en el subsuelo en tiempos posteriores a la depositación de la Formación Comodoro Rivadavia y se conectaron tempranamente en la historia del sistema extensional. Luego, el crecimiento se orienta en la dirección del desplazamiento, alcanzando la superficie del terreno hacia el inicio del Cenozoico y controlando la acumulación de las secuencias sin-sedimentarias paleógenas. En las zonas afectadas por los lineamientos de orientación N-S y NNE-SSO las fallas tienen poco desplazamiento y la transferencia de rechazo hacia las estructuras transversales pudo haber fa-

cilitado la intrusión de cuerpos ígneos.

La escasa conexión física y la poca vinculación genética entre las fallas que cortan la potencial roca madre neocomiana y las fallas de cobertura dificultan la posibilidad de carga de las estructuras de bloque alto a través de las mismas fallas que forman las trampas. En consecuencia, los hidrocarburos presentes en el área de estudio debieron haber migrado mayormente desde las cocinas situadas en el centro de cuenca a través de los niveles permeables y relativamente continuos de la Formación Comodoro Rivadavia. El desplazamiento del techo de esta unidad en las fallas que inclinan hacia el borde de cuenca favoreció el desarrollo de trampas de bloque alto por la yuxtaposición lateral de los reservorios con los niveles impermeables del bloque bajo. La presencia de intrusivos ígneos relacionados a los lineamientos de orientación N-S y NNE-SSO pudo generar sellos laterales que contribuyen al entrapamiento de los hidrocarburos.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a las autoridades de YPF S.A. por permitir la publicación de este estudio y a José M. Paredes por la lectura de una versión preliminar del manuscrito. Las sugerencias realizadas por los revisores Raúl E. Giacosa y Laura Giambiagi contribuyeron al mejoramiento de este trabajo.

TRABAJO CITADOS EN EL TEXTO

- Ardolino, A., Franchi M., Remesal M. y Salani, F. 1999. El volcanismo en la Patagonia extraandina. En: Caminos R. (Ed.), Geología Argentina. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Anales 29: 579-612, Buenos Aires.
- Barnett, J.A.M., Mortimer, J., Rippon, J.H., Walsh, J.J. y Watterson, J. 1987. Displacement geometry in the volume containing a single normal fault. American Association of Petroleum Geologists Bulletin 71: 925-937.
- Baudon, C. y Cartwright, J. 2008. The kinematics of reactivation of normal faults using high resolution throw mapping. Journal of Structural Geology 30: 1072-1084.
- Bellosi, E.S., Villar H.J. y Laffitte, G.A. 2002. Un

nuevo sistema petrolero en el Flanco Norte de la Cuenca del Golfo San Jorge: Revaloración de áreas marginales y exploratorias. 5º Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos: CD, Mar del Plata.

- Bonaparte, J.F. y De Gasparini, Z.B. 1978. Los saurópodos de los grupos Neuquén y Chubut y sus relaciones cronológicas. 7º Congreso Geológico Argentino, Actas 2: 393-406. Neuquén.
- Bouvier, J.D., Kaars-Sijpesteijn, C.H., Kluesner, D.F., Onyejekwe, C.C. y Van Der Pal, R.C. 1989. Three-dimensional seismic interpretation and fault sealing investigations, Nun River Field, Nigeria. American Association of Petroleum Geologists Bulletin 73: 1397-1414.
- Cartwright, J.A., Trudgill, B.D. y Mansfield, C.S. 1995. Fault growth by segment linkage: an explanation for scatter in maximum displacement and trace length data from the Canyonlands Grabens of SE Utah. Journal of Structural Geology 17: 1319-1326.
- Cayo, E.L., Crovetto, C.B., Plazibat, S.G., Stein, J.E., Díaz, M.T. y Paredes, J.M. 2011. Control tectónico sobre la sedimentación de la Formación Mina del Carmen en el Yacimiento Cerro Dragón, Cuenca del Golfo San Jorge, Argentina. 8º Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Trabajos Técnicos: 397-418, Mar del Plata.
- 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.
- Childs, C., Nicol, A., Walsh, J.J. y Watterson, J. 2003. The growth and propagation of synsedimentary faults. Journal of Structural Geology 25: 633-648.
- Ferello, R. 1969. Intento de sistematización geocronológica de las rocas eruptivas básicas en sectores de Chubut y Santa Cruz. Cuartas Jornadas Geológicas Argentinas 1: 293-310, Buenos Aires.
- Feruglio, E. 1950. Descripción geológica de la Patagonia. Dirección General de Yacimientos Petrolíferos Fiscales 3: 431 p, Buenos Aires.
- Figari, E., Strelkov, E., Laffitte, G., Cid de la Paz, M., Courtade, S., Celaya, J., Vottero, A., Lafourcade, P., Martínez, R. y Villar, H. 1999. Los sistemas petroleros de la cuenca del Golfo San Jorge. Síntesis estructural, estratigráfica y geoquímica. Boletín de Informaciones Petroleras 60: 54-90.

- Figari, E., Strelkov, E., Cid de la Paz, M. S., Celaya, J., Laffitte G. y Villar, H. J. 2002. Cuenca del Golfo San Jorge: Síntesis estructural, estratigráfica y geoquímica. En: Haller, M.J. (Ed.), *Geología y Recursos Naturales de Santa Cruz*: 571-601, Buenos Aires.
- Fitzgerald, M.G., Mitchum, R.M., Uliana, M.A. y Biddle, K.T. 1990. Evolution of the San Jorge Basin, Argentina. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 74: 879-920.
- Foix, N., Paredes, J.M. y Giacosa, R.E. 2012. Upper Cretaceous-Paleocene extensional phase in the Golfo San Jorge basin (Argentina): growth-fault model, paleoseismicity and paleostress analysis. *Journal of South American Earth Sciences* 33: 110-118.
- Hechem, J.J., Figari, E.G. y Musacchio, E.A. 1987. Cuenca del Golfo San Jorge: Hallazgo de la Formación D-129. *Información estratigráfica y paleontológica. Petrotecnia* 28: 13-15.
- 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: 89-98.
- Jalfín, G.A., Bellosi, E.S., Smith, E. y Laffitte, G., 2002. Generación de petróleo y carga de reservorios en Manantiales Behr, Cuenca del Golfo San Jorge: un caso de exploración en áreas maduras. 5° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos: CD, Mar del Plata.
- Jalfín, G.A., Manceda, R., Palacio, L., Bellosi, E.S., Chebli, P., Coria, C., Karina M. y Sanz, A. 2005. Caracterización de trampas y sellos en la Cuenca del Golfo San Jorge: Esquema de compartimentación. En: Kozłowski, E., Vergani, G. y Boll, A. (Eds.), *Las Trampas de Hidrocarburos en las Cuencas Productivas de Argentina*: 415-450, Mar del Plata.
- Kim, Y-S. y Sanderson, D. 2005. The relationship between displacement and length of faults: a review. *Earth-Science Reviews* 68: 317-334.
- Legarreta, L. y Uliana, M.A. 1994. Asociaciones de fósiles y hiatus en el Supracretácico-neógeno de Patagonia: una perspectiva estratigráfico-secuencial. *Ameghiniana* 31: 257-281.
- Lesta, P.J. 1968. Estratigrafía de la Cuenca del Golfo San Jorge. 3° Jornadas Geológicas Argentinas, Actas 1: 171-182, Buenos Aires.
- Lesta, P.J. y Ferello, R. 1972. Región Extraandina de Chubut y Norte de Santa Cruz. En: Leanza, A.F. (Ed.), *Primer Simposio de Geología Regional Argentina*, Academia Nacional de Ciencias: 601-653, Córdoba.
- Lesta, P.J., Ferello, R. y Chebli, G. 1980. Chubut Extraandino. En: Turner, J.C.M. (Ed.), 2° Simposio de Geología Regional Argentina, Academia Nacional de Ciencias: 1307-1387, Córdoba.
- Morley, C.K., Gabdi S. y Seusutthiya K. 2007. Fault superimposition and linkage resulting from stress changes during rifting: Example from 3D seismic data. Phitsanulok Basin, Thailand. *Journal of Structural Geology* 29: 646-663.
- Nicol, A., Watterson, J., Walsh, J.J. y Childs, C., 1996. The shapes, major axis orientations and displacement patterns of fault surfaces. *Journal of Structural Geology* 18: 235-248.
- Rodríguez, J.F.R. 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.
- Sciutto, J.C. 1995. Origen y migración de los hidrocarburos en la cuenca del Golfo San Jorge, sur del Chubut y norte de Santa Cruz, Argentina. *Revista Naturalia Patagónica, serie Ciencias de la Tierra* 3: 1-23.
- Schlische, R.W. 1995. Geometry and origin of fault-related folds in extensional settings. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 79: 1661-1678.
- Sylwan, C.A., Rodríguez, J.F. y Strelkov E. E. 2008. Petroleum Systems of the Golfo San Jorge Basin, Argentina. En: Cruz, C.E., Rodríguez, J.F., Hechem, J.J. y Villar, H.J. (Eds.), *Sistemas Petroleros de las Cuencas Andinas*. 7° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos: 53-78, Mar del Plata.
- Uliana, M.A. y Legarreta, L. 1999. Jurásico y Cretácico de la Cuenca del Golfo San Jorge. En: Caminos R. (Ed.), *Geología Argentina*. Instituto de Geología y Recursos Naturales. *Anales* 29: 496-510, Buenos Aires.
- Uranga, R., Ciapparelli, H., Acosta, N. y Gheineim T. 2011. Análisis de la capacidad sellante en fallas normales y sus implicancias, Yacimiento El Alba Valle, cuenca del Golfo San Jorge. 8° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, *Trabajos Técnicos*: 375-396, Mar del Plata.
- Vergés, J., Sanz, M., Gómez, M., Martínez, A., Cristallini, E., Pérez, D., Righetti, J. y Smith, E. 2001. Estudio Tectónico de Manantiales Behr, Cuenca del Golfo San Jorge (Argentina). Repsol-YPF (Informe Inédito), 102 p, Comodoro Rivadavia.
- Walsh, J.J. y Watterson, J. 1987. Distributions of cumulative displacement and seismic slip on a single normal fault surface. *Journal of Structural Geology* 9: 1039-1046.
- 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. (Ed.), *The Geometry of Normal Faults*, Geological Society Special Publication 56: 193-203.
- Walsh, J.J., Nicol, A. y Childs, C. 2002. An alternative model for the growth of faults. *Journal of Structural Geology* 24: 1669-1675.
- Willemse, E., Pollard, D. y Aydin, A. 1996. Three-dimensional analyses of slip distributions on normal fault arrays with consequences for fault scaling. *Journal of Structural Geology* 18: 295-309.

Recibido: 3 de abril, 2014

Aceptado: 9 de octubre, 2014