

10º Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos
Sesiones Generales: "Energía y Sociedad, aliados inseparables"

ANALOGÍAS ENTRE LA SIERRA SILVA Y EL ANTICLINAL PERALES: IMPACTO EN EL ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA FAJA PLEGADA DE SAN BERNARDO (CUENCA DEL GOLFO SAN JORGE)

José Oscar Allard¹, Nicolás Foix², Sebastián Bueti¹, María Leonor Ferreira Pittau³, Mario Atencio⁴

1: Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco. joseoallard@yahoo.com.ar, buetisebastian@hotmail.com.ar

2: Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco - CONICET. nicofoix@hotmail.com

3: YPF S.A. - Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, leonor.ferreira@ypf.com

4: YPF S.A., mario.atencio@ypf.com

Palabras clave: **análisis estructural multiescala, inversión tectónica positiva, estructura pop-up, compresión andina cretácica-cenozoica**

ABSTRACT

Analogy between Sierra Silva and Perales Anticline: Impact in the Structural Analysis of the San Bernardo Fold Belt (Golfo San Jorge Basin)

The San Bernardo Fold Belt (SBFB) is a region of the Golfo San Jorge Basin (GSJB) characterized by N-S to NNW-SSE folds linked to positive tectonic inversion. Almost all of these folds have a multiphase construction origin. The Sierra Silva (SS) is among the most characteristic morphostructure of the SBFB. The topographic and structural architecture of SS expose a NNE-SSW complex fold, segmented by faults oblique to the fold axis, these brittle structures have lateral and vertical displacement components. These faults are interpreted as secondary faults partially reactivated and exhumed during the cenozoic tectonic inversion. The morphology of this fold and its tectonostratigraphic evolution contribute fundamental evidences to extrapolate them to the analogues structures in subsurface.

Southern to the Senguerr River elbow, the SBFB is developed in the subsurface of the GSJB where many of these fault-fold structures are oil bearing structural traps. In particular, Perales Anticline (PA) constitute one of the main structures of the Los Perales-Las Mesetas block. These structure has been systematically studied and developed since its discovery in 1934. Although this scenario, at the present time the validated structural interpretations are contrasting and antagonistic. On one hand it is proposed a tectonostratigraphic evolution where the Castillo Formation (Albian-Cenomanian) represent a sin-inversion unit, while on the other hand, that unit is linked to the extensional-thermal subsidence of the basin.

The present contribution makes the geometric, kinematic and dynamic structural analysis of both fault-related folds to define analogies and differences between them. In cross sections perpendicular to the folds axis, the strata (SS) and the sismo-sequences (PA) do not show stratigraphic wedges linked to growth-strata towards the folds hinge. This characteristic, in addition with the absence of progressive unconformities, sustain an uplift after the deposition of the Chubut Group base. This context is support with inlines parallel to the main fault of PA, where that stratigraphic interval shows an increasing in the stratigraphic thickness and reflectors divergence toward the crest of the braquianticline. At the same time, the transverse to oblique secondary faults show evidences of sin-extensional activity, so them can be interpreted as cretaceous extensional brittle structures

reactivated during the inversion. This architecture is analogous to the recognized at surface at SS. Revalidation of an extensional-thermal tectonostratigraphic context for the base of the Chubut Group is essential to define strategies for the production and exploration of nontraditional stratigraphic levels.

INTRODUCCIÓN

La cuenca del Golfo San Jorge es una de las mayores productoras de hidrocarburos de Argentina. Su columna de sedimentos cretácicos pertenecientes al Grupo Chubut supera los 4000 m de espesor en el centro de cuenca (Pozo YPF.SC.PDA.x-1) y contiene los principales elementos del sistema petrolero (Fig. 1.A). En este sentido, las formaciones Bajo Barreal y Castillo aportan los reservorios de origen fluvial (Fitzgerald *et al.* 1990, Figari *et al.* 1999; Rodríguez y Littke 2001); mientras que la Fm. Pozo D-129 se asocia a un paleoambiente lacustre al cual se vinculan la roca madre y los reservorios no tradicionales de origen deltaico o de abanicos profundos (Paredes *et al.* 2011; Basile *et al.* 2014; López Angriman *et al.* 2014, Paredes *et al.* 2014; Atencio *et al.* 2015). La estratigrafía tiene como marco estructural cinco regiones bien definidas a partir de los dominios en el estilo de deformación: Flanco Norte, Centro de Cuenca, Flanco Sur, Flanco Oeste y Faja Plegada de San Bernardo (FPSB) (Fig. 1.B). Esta última región se caracteriza por el desarrollo de un tren estructural N-S a NNO-SSE definido por fallas normales, fallas inversas y pliegues asimétricos. La visión clásica de estas estructuras contraccionales las vincula a inversión tectónica positiva generada durante la compresión andina cenozoica (Fitzgerald *et al.* 1990; Uliana *et al.* 1995, Homovc *et al.* 1995; Peroni *et al.* 1995; Figari *et al.* 1999). Sin embargo recientes contribuciones retoman el modelo geodinámico de Barcat *et al.* (1989), donde las fallas comienzan a invertirse a partir de la base del Grupo Chubut (Gianni *et al.* 2015a,b; Gianni *et al.* 2016). El objetivo general del presente estudio fue realizar un análisis estructural geométrico, cinemático y dinámico de dos pliegues clásicos de la FPSB: el anticlinal de sierra Silva y el anticlinal Perales (Fig. 1.B). El primero representa una morfoestructura aflorada en la región centro-sur de la Provincia del Chubut, mientras que el segundo es un pliegue de subsuelo conocido por ser una de las más importantes trampas de hidrocarburos de la FPSB en el norte de la Provincia de Santa Cruz (Hechem 2015). El análisis integrado de afloramiento y subsuelo permitió proponer mecanismos de construcción de los pliegues, ajustar el contexto tectonoestratigráfico durante el Cretácico (Aptiano-Cenomaniano) y reevaluar el timing de la inversión tectónica positiva en ese intervalo temporal. Los resultados obtenidos son fundamentales para definir la influencia de las estructuras tectónicas en los elementos del sistema petrolero, ya sea durante los períodos extensionales o contraccionales.

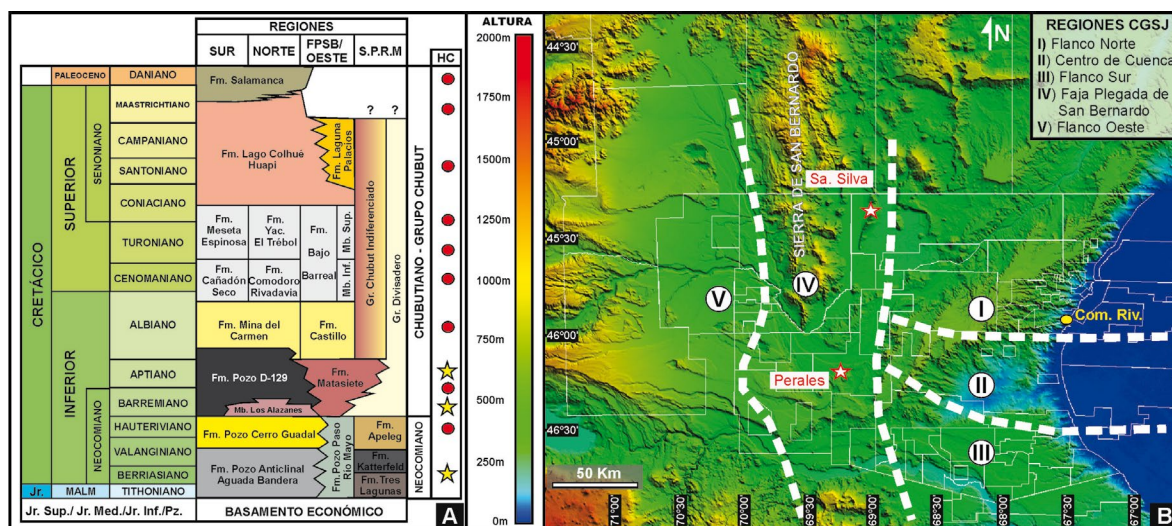


Figura 1. A) Cuadro cronoestratigráfico de la cuenca del Golfo San Jorge (modificado de Sylwan *et al.* 2011). Se indican los elementos del sistema petrolero: rocas reservorio (puntos rojos) y rocas madres (estrellas amarillas). S.P.R.M.: Subcuenca Paso Río Mayo. B) Modelo digital de elevación de la cuenca del Golfo San Jorge indicando las regiones estructurales (basado en Figari *et al.* 1999). En trazo fino se indican las áreas petroleras de la cuenca del Golfo San Jorge.

CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL

Anticlinal de Sierra Silva

El anticlinal de Sierra Silva (SS) es la morfoestructura que separa el lago Musters del Colhué Huapi, constituyendo un elemento clásico de la expresión en superficie de la FPSB (Fig. 1, 2). La sierra se caracteriza por una geometría general elongada en dirección NNE-SSO, con una longitud de 34 km, un ancho máximo de 5 km, una superficie de $\sim 117 \text{ km}^2$, una altura máxima de 690 msnm y una diferencia de altura máxima de ~ 300 metros con los depósitos aluviales modernos que la rodean (Fig. 2). La morfología de la sierra define un margen occidental con menor sinuosidad que el oriental, con valores de 1.16 y 1.43 respectivamente. La zona centro-norte presenta las mayores alturas, a partir de allí se pierde gradualmente el relieve estructural hacia el sur y de forma abrupta hacia el norte al encontrarse con el lineamiento del cerro Chenques, donde se desarrolla un resalto de ~ 200 metros (Fig. 2). La SS se vincula a la inversión tectónica positiva de una falla de rumbo NNE-SSO e inclinación al Este (Sciutto 1981; Barcat *et al.* 1989; Peroni *et al.* 1995; Giacosa y Paredes 2008; Allard *et al.* 2015a), mientras que el lineamiento del cerro Chenques a una falla de desplazamiento lateral (Sciutto 1981; Barcat *et al.* 1989; Stach 1986; Giacosa y Paredes 2008; Paredes 2009), o a una falla normal invertida con deformación 3D (Allard *et al.* 2015a; Allard *et al.* 2016; Bueti *et al.* 2017). Un rasgo de particular interés para el objetivo de este estudio lo constituyen fallas de menor jerarquía oblicuas al eje del pliegue, las cuales presentan componentes de desplazamiento lateral y de inclinación. Estas estructuras se asocian a fallas normales parcialmente recizalladas y exhumadas durante el proceso de inversión tectónica

cenozoico. La morfología compleja de SS se interpreta como consecuencia del crecimiento lateral de un pliegue de inversión vinculado a una falla normal principal con estructuras secundarias asociadas (Allard *et al.* 2015a).

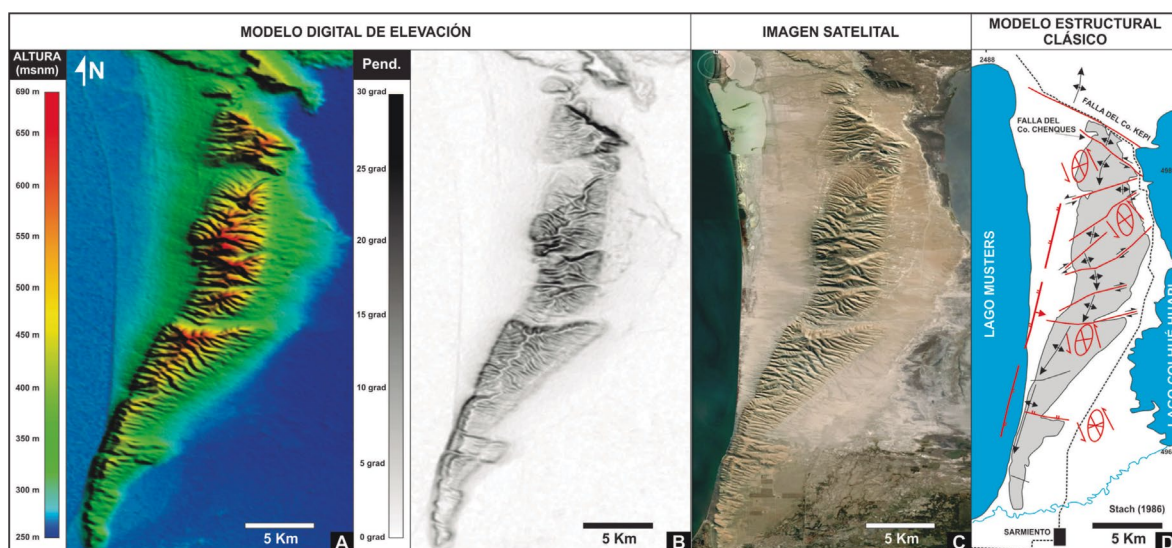


Figura 2. Caracterización topográfica (A, B) y satelital (C) de la morfoestructura Sierra Silva. D) Modelo estructural clásico donde se interpreta los lineamientos oblicuos al eje de la sierra como fallas de desplazamiento lateral (basado en Sciutto 1981; Stach 1986; Peroni *et al.* 1995).

El extremo norte de la SS permitió realizar un análisis geométrico de la arquitectura estructural en una sección casi perpendicular al eje del pliegue de inversión. La cartografía de superficie realizada en el bloque alto del lineamiento del cerro Chenques (Fig. 3) expone un dominio estructural con dos planos axiales convergentes, definiendo un pliegue conjugado con charnela subredondeada. La cresta del anticlinal SS coincide con el punto de cierre (sensu Twiss y Moores 1992) y el eje del pliegue, donde la estratificación sedimentaria (S0) es subhorizontal (Fig. 3 y 4). El limbo frontal de SS presenta valores de inclinación máxima de $27^\circ/\text{N}299^\circ$ mientras que en posiciones cercanas al punto de cierre de $14^\circ/\text{N}311^\circ$, por lo cual el plano axial principal inclina $20^\circ/303^\circ$. El limbo dorsal está distorsionado por un monoclinal inclinado (sensu Keller 1955) de rumbo 187° , con flancos suaves de $12^\circ/\text{N}62^\circ$ y $21^\circ/\text{N}80^\circ$, y flanco abrupto de $30^\circ/74^\circ\text{N}$ (Fig. 3). Asumiendo una inclinación de $21^\circ/\text{N}80^\circ$ y $14^\circ/\text{N}125^\circ$ para el limbo dorsal de SS, el plano axial secundario inclina $16^\circ/\text{N}98^\circ$. El monoclinal comparte el flanco con un sinclinal simétrico suave de rumbo 176° y ángulo interlimbo 138° (Fig. 3). La mitad de longitud de onda del pliegue principal se define en ~ 4 km a partir del ancho máximo de la sierra en una orientación perpendicular al eje de la estructura. Este valor es mínimo ya que no afloran los puntos de inflexión y en consecuencia no se pueden ubicar las superficies medias del pliegue (Ramsay y Huber 1987). En este marco geométrico, la arquitectura estratigráfica de la Fm. Castillo se caracteriza por espesores constantes de las secuencias de tobas tabulares vinculadas a paleosuelos y lagunas (Fig. 4) (Buetti *et*

al. 2017). Esta formación contiene unidades geomecánicas que desarrollan abundantes diaclasas y planos de fracturas con estrías y desplazamiento de cizalla centimétrico. Estas discontinuidades estructurales se vinculan principalmente al proceso de flexodeslizamiento durante la construcción del pliegue (Ramsay y Huber 1987; Twiss y Moores 1992; Van Der Pluijm y Marshak 2004). Dicho

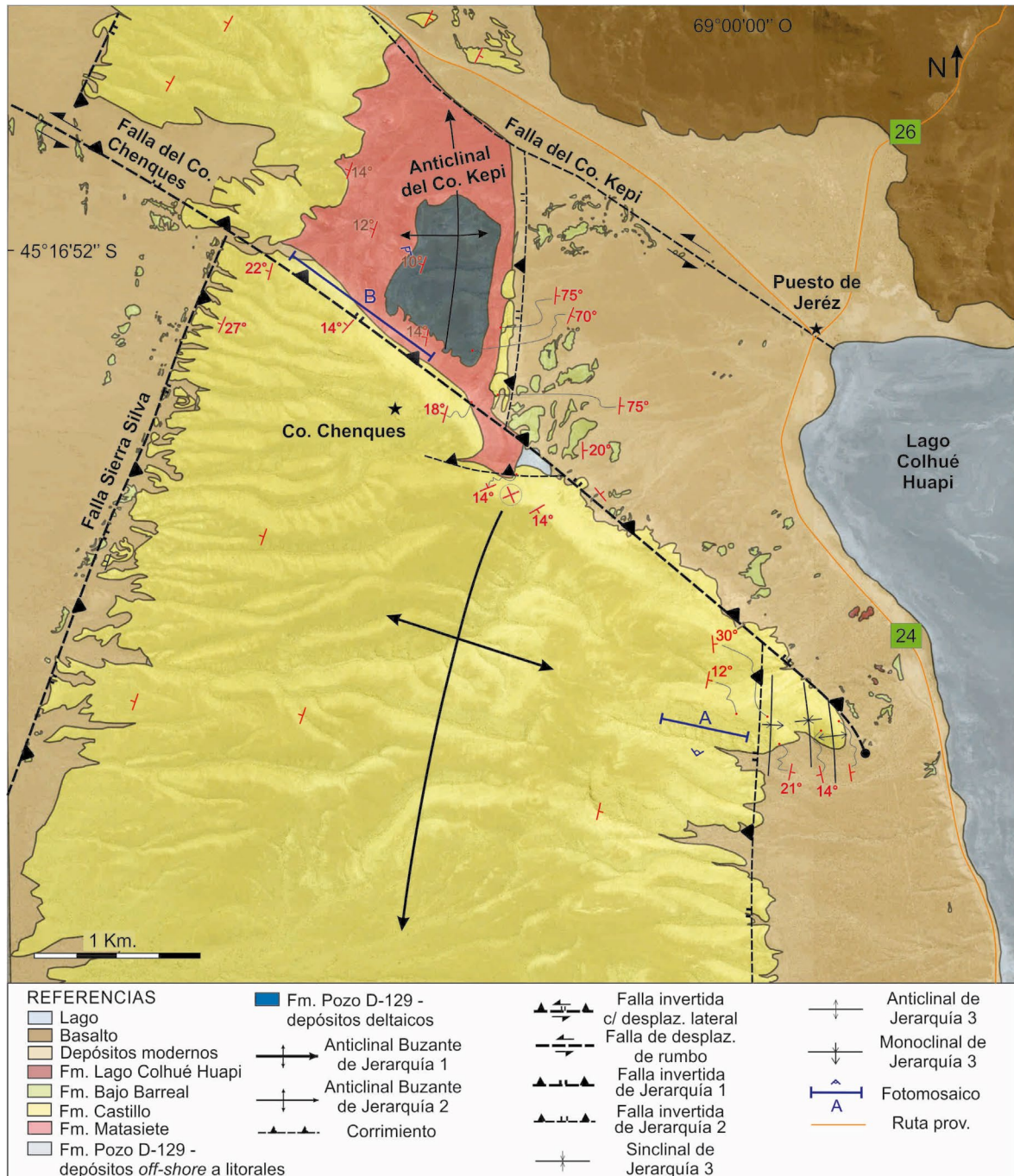


Figura 3. Mapa estructural del sector norte de la Sierra Silva. El lineamiento del cerro Chenques define dos dominios estructurales. El sector norte a este elemento expone un pliegue asimétrico donde aflora la Fm. Pozo D-129, mientras que el sector sur se asocia a pliegue de inversión simétrico vinculado a la falla Sierra Silva y una falla secundaria antitética ciega. Notar el desarrollo de un pliegue monoclinal en el limbo dorsal de pliegue principal (basado en Buetti *et al.* 2017).

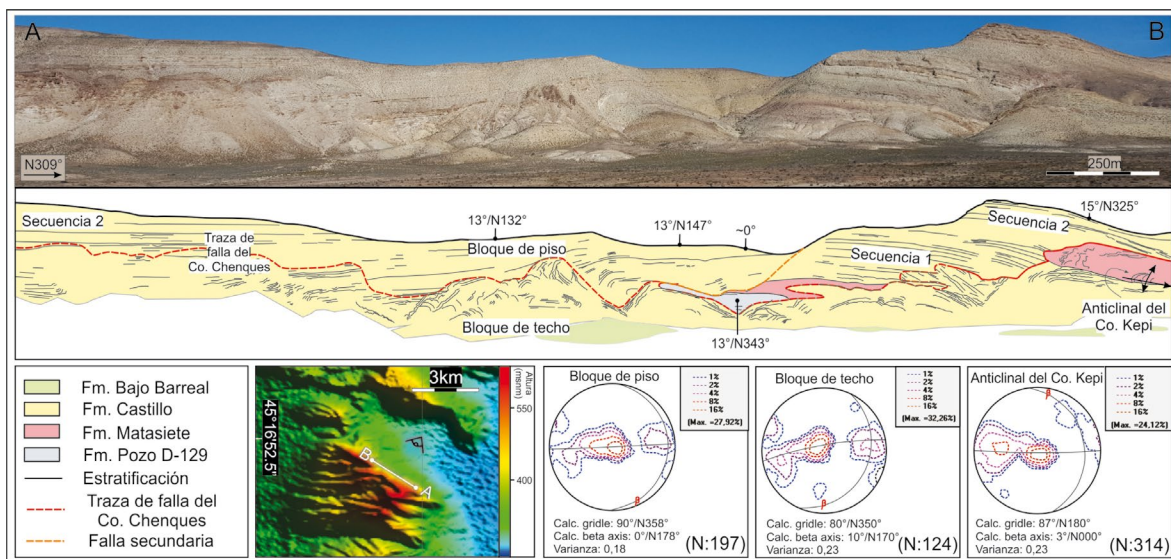


Figura 4. Panel de afloramiento subparalelo a la falla del cerro Chenques. Se indican los bloques estructurales y los diagramas de densidad de polos de la estratificación. Notar el contacto estructural entre las unidades cretácicas y la tabularidad de las secuencias tobáceas de la Fm. Castillo (basado en Bueti *et al.* 2017). La interpretación contrasta con la propuesta de Gianni *et al.* (2015a) donde se vinculan los estratos de ambos bloques estructurales, a partir de los cuales se interpretan estratos de crecimiento y discordancias progresivas.

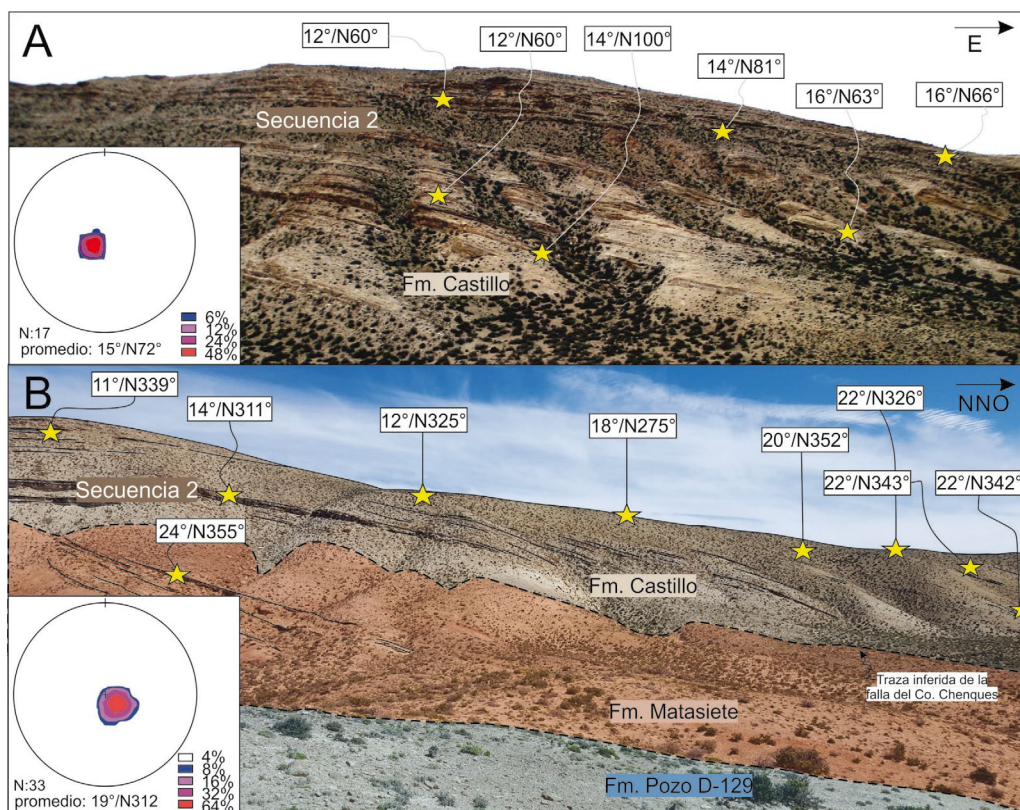


Figura 5. Paneles de afloramiento del limbo dorsal (A) y frontal (B) del pliegue de inversión Sierra Silva. Se incluye la distribución circular de polos de ambos flancos. Los niveles estratigráficos de la Fm. Castillo son concordantes y su inclinación varía en base a la posición estructural dentro del pliegue. Ver la ubicación estratigráfica de la Secuencia 2 en la figura 4.

mecanismo de plegamiento se sustenta en la arquitectura estructural de superficie y subsuelo, donde se puede mencionar I) la disminución sistemática de inclinación de la estratificación hacia el plano axial (Figs 3, 4 y 5), II) el patrón convergente de isógonas y III) el patrón general en el perfil de dipmeter del pozo YPF.Ch.SS.es-1, donde la inclinación disminuye hacia arriba (para mayor detalle ver Buetti *et al.* 2017).

El bloque bajo del lineamiento del cerro Chenques desarrolla un pliegue conjugado con geometría tipo kink, asimétrico, con flanco abrupto hacia el Este (anticlinal del cerro Kepi sensu Buetti *et al.* 2017). Esta estructura se considera de menor orden que el pliegue de SS y sería consecuencia de la propagación de una falla ciega (Buetti *et al.* 2017). La correlación entre esta última y la falla ciega responsable del monoclinal del limbo dorsal de SS es solo especulativa al momento de confección de esta contribución.

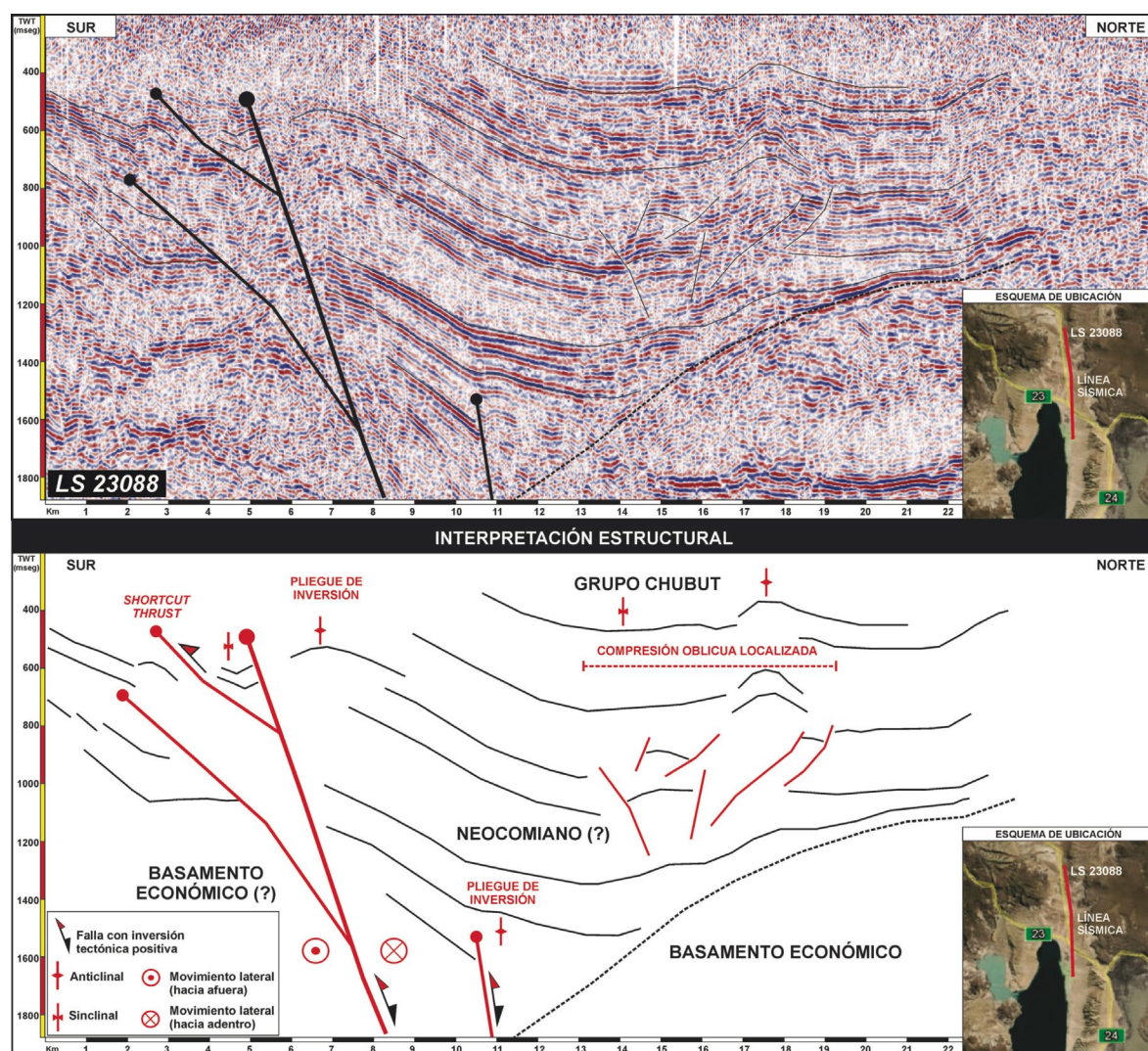


Figura 6. Línea sísmica 2D donde se interpreta una falla principal correlacionada con el lineamiento del cerro Chenques. La cinemática sinistral surge de la integración con la falla del cerro Chenques. La sismoestratigrafía evidencia un depocentro asimétrico y la arquitectura estructural define estructuras ciegas vinculadas a la inversión tectónica suave. El acortamiento frágil-dúctil localizado se interpreta como consecuencia de la deformación 3D bajo un contexto de cizalla subsimple.

La información de superficie se complementa con una sección sísmica que intercepta la proyección del lineamiento del cerro Chenques (Fig. 6). Este elemento se correlaciona en el subsuelo con una falla principal con un patrón sismoestratigráfico que define un depocentro extensional bien desarrollado (Neocomiano?), al que suprayace el Grupo Chubut por correlación con las unidades afloradas en superficie. Las secuencias sísmicas incrementan su espesor hacia el plano de falla principal, con una mayor asimetría hacia los términos basales. La fábrica estructural de subsuelo define un sinclinal de 10 km de longitud de onda media y un anticlinal fallado de menores dimensiones contra el plano de falla (Fig. 6). Localmente se definen discontinuidades y plegamientos interpretados como rasgos generados por contracción oblicua bajo un régimen de cizalla subsimple (Fossen 2010). Estos se correlacionan con flores positivas de mesoescala expuestas en superficie en la traza del lineamiento del cerro Chenques (Paredes 2009).

El análisis geométrico de la sierra Silva define una falla principal de rumbo 193° y una estructura antitética ciega subparalela (Rbo 186°), esta última se infiere en superficie a partir del monoclinal desarrollado en el flanco oriental del extremo norte de la morfoestructura. En este contexto, la geometría clásica propuesta para pliegues de inversión no se cumple, ya que para esto el pliegue debería ser amplio y con una marcada asimetría entre el limbo frontal y dorsal (ver Discusión). Desde el punto de vista cinemático y dinámico, los corrimientos de mesoescala de rumbo N-S a NNO-SSE afectando las rocas de la Fm. Castillo se interpretan como estructuras neoformadas durante la fase de inversión tectónica del Cretácico Superior tardío - Cenozoico. Estas se utilizaron para calcular los tensores locales a partir de los cuales se orientaron los ejes de deformación y los esfuerzos principales (Marret y Allmendinger, 1990). De esta forma se definió la dirección de máximo acortamiento y la orientación del esfuerzo principal máximo en sentido E-O (Fig. 7), en concordancia con el marco geodinámico regional (Ramos 2015; Fig. 11 de Müller *et al.* 2016). Bajo este régimen compresivo, la componente lateral sinistral de la falla del cerro

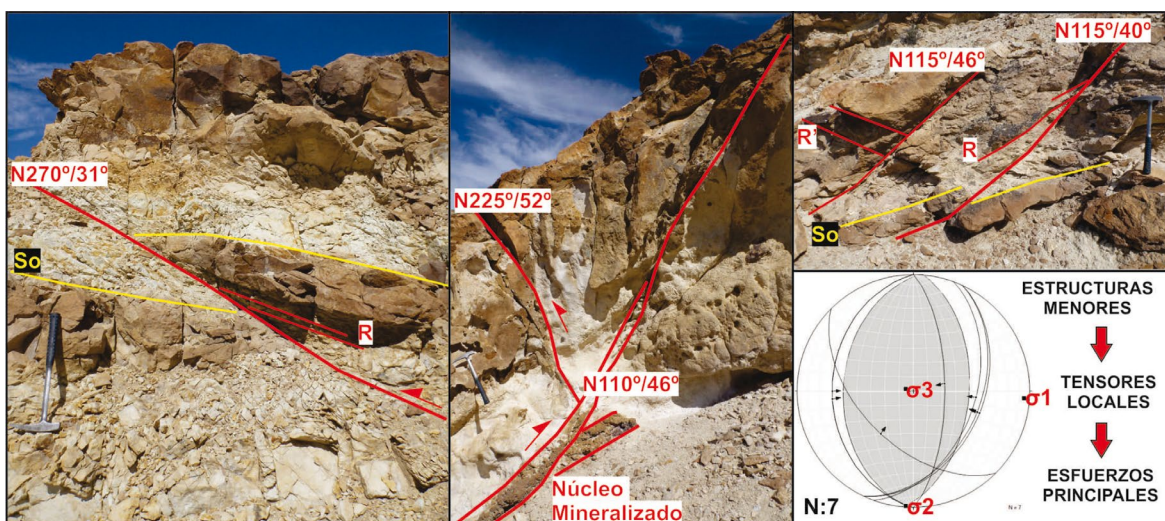


Figura 7. Corrimientos y fallas inversas mesoscópicas afectando la Fm. Castillo en cercanías de la falla del cerro Chenques. La cinemática se define con indicadores pasivos (S0) y con fracturas tempranas Riedel sintéticas (R) y antitéticas (R'). El análisis dinámico basado en las mesoestructuras define un régimen compresivo con σ_1 orientado E-O.

Chenques se interpreta como consecuencia de la fábrica extensional que define un rumbo de falla de $\sim 128^\circ$, el cual favorece la deformación 3D y la partición de la deformación durante el recizallado. De esta forma el régimen tectónico regional estaría localmente distorsionado durante la inversión tectónica. La arquitectura estructural de SS y el desarrollo de secuencias concordantes tabulares sin el desarrollo de discordancias progresivas sustentan un análisis geodinámico donde la inversión tectónica es posterior a la depositación de la Fm. Castillo de edad Albiana (Suárez *et al.* 2014). Los contextos tectonoestratigráficos de las formaciones Bajo Barreal, Laguna Palacios y Lago Colhué Huapi en el ámbito de la FPSB también respaldan que la fase contraccional que deforma la Fm. Castillo se inicia en el Cretácico Superior tardío (ver Discusión).

Anticlinal Perales

La estructura anticlinal Perales (AP) ha sido estudiada desde 1934, con auge desde 1974, debido su potencial económico (Hechem 2015). La caracterización general de AP no ha cambiado sustancialmente desde la contribución de Homovc *et al.* (1995) donde se utilizó información sísmica de YPF obtenida en la década de 1980. La figura 10 de estos autores define un braquianticlinal simétrico de rumbo general N20°, ~ 30 km de longitud y ~ 5 km de ancho máximo. Este pliegue está limitado por dos fallas inversas convergentes, una falla principal con inclinación al NO y otra secundaria al SE. La presente contribución utilizó información de un cubo sísmico para complementar el análisis estructural clásico. Desde el punto de vista cinemático y dinámico, Homovc *et al.* (1995) la interpretan como una estructura extensional invertida durante el Terciario, mientras que recientemente Gianni *et al.* (2015a) retoman la propuesta de Barcat *et al.* (1989) donde se propone su inversión en el Cretácico Inferior, durante el inicio de la sedimentación del Grupo Chubut. Con el fin de comprender su evolución se realizó el análisis geométrico de una sección perpendicular y otra subparalela a la estructura principal (Fig. 8). Los markers sísmicos del Grupo Chubut fueron definidos a partir de perfiles de pozo, mientras que el tope de la secuencia neocomiana mediante el patrón sísmico característico. La sección sísmica transversal (InLine 1234) expone el pliegue vinculado a la falla principal de rumbo NNE con inclinación al NO (Fig. 9). Para evaluar el timing de la estructura se recurrió a calcular el Índice de Asimetría de las secuencias (IA) (Mitra 1993; Groshong 2006; Allmendinger 2015; Clark y Cartwright 2012). Este concepto consiste en comparar los espesores preservados en distintas posiciones de la estructura, sin la necesidad de convertir la información sísmica del dominio del tiempo a profundidad. Al mismo tiempo este índice se complementó con el estudio del patrón sismoestratigráfico de los reflectores (geometría, terminaciones, discordancias, acuñaientos). También se realizó la horizontalización (flattening) de la XLine con el fin de analizar la macroarquitectura sismoestratigráfica a lo largo de la falla principal de AP. Debe mencionarse que esta metodología no implica una reconstrucción estructural rigurosa, solo representa una técnica utilizada para la correlación lateral (Herron 2011)

y la evaluación de patrones sismoestratigráficos (Zeng 2007). Su uso en este estudio se validó a partir de la conservación de los espesores sísmicos deformados y horizontalizados. Por otro lado, las inclinaciones estructurales de la sección XLine son suaves, por lo cual la componente horizontal del movimiento oblicuo de partículas puede despreciarse al realizar la horizontalización sin incurrir en errores importantes para la caracterización tectonoestratigráfica.

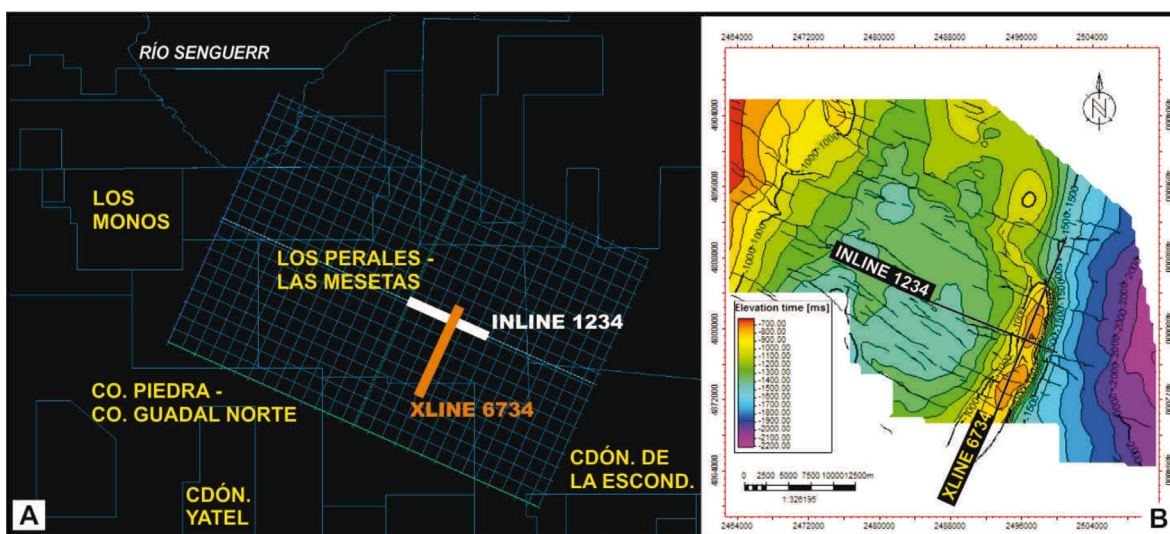


Figura 8. A) Ubicación de las secciones sísmicas caracterizadas en las figuras 9 y 10 en el cubo sísmico Los Perales-Las Mesetas. B) Mapa isócrono del anticlinal Perales al tope de la Fm. Castillo indicando la orientación de las secciones sísmicas analizadas. Notar el sistema de fallas secundarias transversales a la falla principal invertida.

La sección InLine 1234 evidencia que los intervalos basales del Grupo Chubut no son asimétricos entre los bloques principales de la falla Los Perales, es decir entre el bloque bajo y el alto en la posición de la charnela del pliegue ($IA\ 4/5=1.05$, Fig. 9). Al mismo tiempo, en esa posición los reflectores se presentan subparalelos sin desarrollar discordancias intraformacionales. Un escenario distinto expone la sismosecuencia de Fm. Pozo D-129 (intervalo B-A) al evaluar sus espesores en el bloque alto de AP, ya que incrementa su espesor entre 14-17% en una posición alejada del eje del pliegue ($IA=1.14$ y 1.17 , Fig. 9). Esta tendencia se interpreta como consecuencia del incremento relativo de la subsidencia semi-regional hacia el NO. La fábrica interna de las sismofacies está encriptada en el plegamiento actual, sin embargo un análisis detallado al horizontalizar los reflectores define sutiles geometrías. En términos generales las sismofacies tienen un aspecto subparalelo, no obstante algunos intervalos de reflectores presentan truncaciones y terminaciones en downlap hacia la estructura principal, estos últimos patrones fueron interpretados como clinoformas muy suaves.

La sección paralela al rumbo de la estructura (XLine 6734) expone información muy importante para el análisis geométrico (Fig. 10). Desde este punto de vista, la variación del nivel estructural del plegamiento evidencia el patrón general doblemente buzante de la estructura (braquianticlinal). También se reconoce la complejidad que otorgan las estructuras secundarias

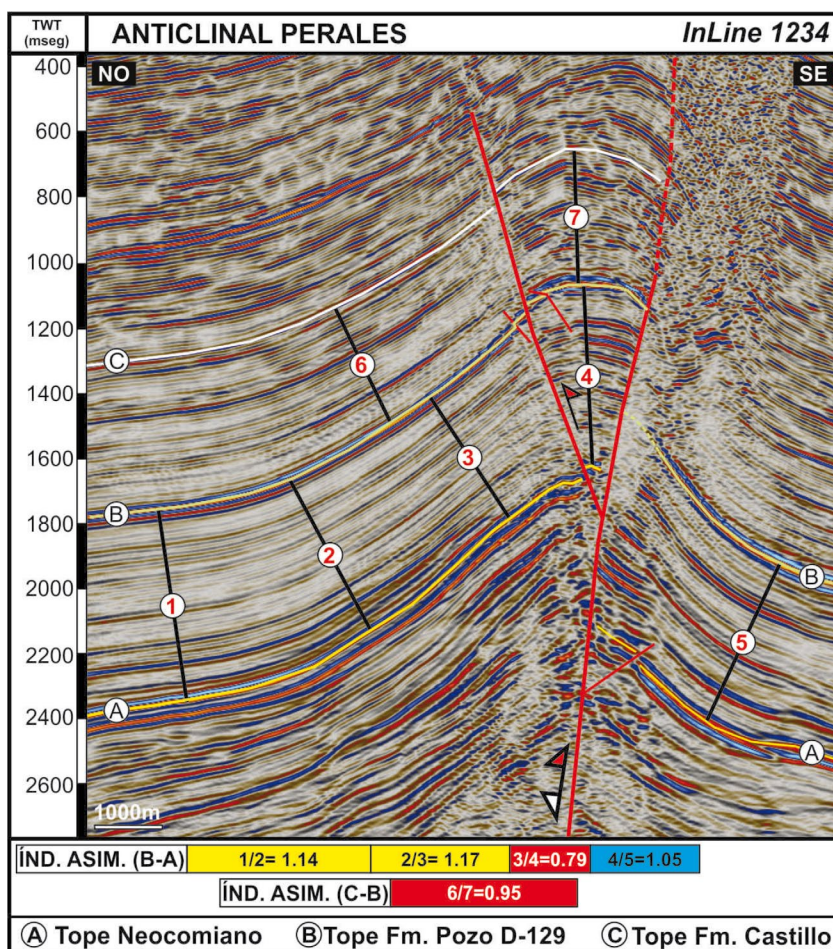


Figura 9. Sección sísmica InLine 1234, perpendicular al eje del anticlinal Perales. Se indica la interpretación estructural y los reflectores del tope del Neocomiano (A), de la Fm. Pozo D-129 (B) y de la Fm. Castillo (C). El índice de asimetría surge de la comparación de espesores, este se indica por intervalo sismoestratigráfico y por posición dentro de la estructura (B-A: Fm. Pozo D-129 y C-B: Fm. Castillo).

transversales a oblicuas a la falla de Los Perales y el desarrollo de fallas menores que definen zonas de daño localizadas o corredores de fracturas (Fig. 10). Los datos de mayor interés para el estudio realizado surgen del IA, los cuales exponen claramente un engrosamiento de hasta el 37% (IA 7/5: 1.37) en las unidades basales del Grupo Chubut hacia la cresta del pliegue (Fig. 10). En estos intervalos asimétricos también se exponen patrones sismoestratigráficos que evidencian una divergencia de reflectores hacia la cresta del pliegue. Esta arquitectura sísmica sustenta un levantamiento estructural posterior a dicho intervalo, ya que de caso contrario en la cresta del pliegue deberían desarrollarse discordancias progresivas y terminaciones on-lap.

Integrando la información transversal y paralela al rumbo de la falla principal se concluye que la estructura no pudo invertirse durante la depositación del Grupo Chubut basal, es decir que dicho intervalo no se vincula a un estadio sin-inversión. Esta interpretación se basa en que no hay acuñamiento significativo en la cresta del pliegue ni discordancias progresivas, ambos criterios son necesarios para definir una secuencia sedimentaria simultánea al plegamiento (Riba

et al. 1976; Suppe *et al.* 1991; Poblet 2012). En consecuencia se comparte el criterio clásico que define un contexto sinextensional-termal para las secuencias basales del Grupo Chubut como las formaciones Matasiete, Pozo D-129 y Castillo (ej. Fitzgerald *et al.*, 1990; Figari *et al.* 1999; Rodríguez y Littke 2001; Sylwan *et al.* 2011). El origen de la extensión en esta etapa se vincula al stress de intraplaca generado durante la rotación horaria de la placa sudamericana (Fitzgerald *et al.* 1990; Paredes *et al.* 2013). Una visión opuesta surge de la propuesta de Gianni *et al.* (2015a), donde solo se reconoce extensión durante la depositación de la Fm. Castillo y se la vincula a un rift sinorogénico (Gianni *et al.* 2015b y 2016). Esta situación deja en evidencia que los modelos geodinámicos están en discusión, para lo cual debe reevaluarse la información geométrica de base de los mismos (Fig. 4).

La evolución tectonoestratigráfica de las secuencias basales del Grupo Chubut se evaluó a partir de la horizontalización de los reflectores sísmicos del tope de las formaciones Pozo D-129 y Castillo (Figs 11A, B y C). La figura 11.B muestra la horizontalización al tope de la Fm. Pozo D-129, en esta se reconoce un patrón tabular a levemente convergente hacia el noreste, localmente el intervalo se engrosa en una posición desfasada respecto del mayor espesor del Neocomiano. La figura 11.C expone el patrón sismoestratigráfico luego de horizontalizar los reflectores utilizando el tope de la Fm. Castillo. Se observa un patrón engrosado al suroeste del mayor espesor del ciclo anterior, en una posición adyacente a una falla secundaria transversal a la falla los Perales. Este intervalo (Fm. Castillo) desarrolla internamente suaves truncaciones y divergencias de reflectores hacia la zona de mayor espesor. Siguiendo la propuesta de Morley (2002) se interpreta un control extensional tipo sin-rift tardío (o reactivación extensional) en la depositación de las formaciones Matasiete y Castillo. En este esquema, la disminución de la actividad de la falla respecto del Neocomiano se manifiesta en la mayor tabularidad de los depósitos a lo largo del rumbo y en las suaves discordancias asociadas. En el caso del sistema Matasiete-Pozo D-129, la geometría de los reflectores indica el balance entre la sedimentación y el espacio de acomodación tectónicamente inducido, sustentando la actividad de toda la longitud de la falla (Escenario A de la Fig. 11.D). En un escenario distinto, las discordancias en la Fm. Castillo se interpretan debido a la contracción del desplazamiento hacia el centro de la falla (Escenario B de la Fig. 11.D).

El análisis espacio-temporal de los espesores máximos en la sección paralela al rumbo del AP evidencia la migración lateral de los segmentos con mayor actividad de la falla Los Perales (Morley 1999). La mayor asimetría de espesores se presenta en las secuencias del Neocomiano, sustentando la etapa de climax de sin-rift (Schlische 1991; Prosser 1993; Morley 1995; Morley *et al.* 2000; Withjack *et al.* 2002). El patrón irregular de la asimetría de ese intervalo sugiere el crecimiento de la estructura a partir de la expansión de la falla y la coalición de estructuras individuales (Contreras y Scholz 2001; Morley 2002). En particular, el engrosamiento local de la Formación Castillo se interpreta como la conjunción del hundimiento de la falla Los Perales y de una falla secundaria transversal a oblicua a la misma. Esa estructura secundaria puede interpretarse como I) una

falla extensional de alivio del sistema principal (Destro 1995; Destro *et al.* 2003) o II) como una estructura vinculada a un pulso de reactivación extensional no-coaxial, similar al identificado por Paredes *et al.* (2018) en el flanco sur de la CGSJ.

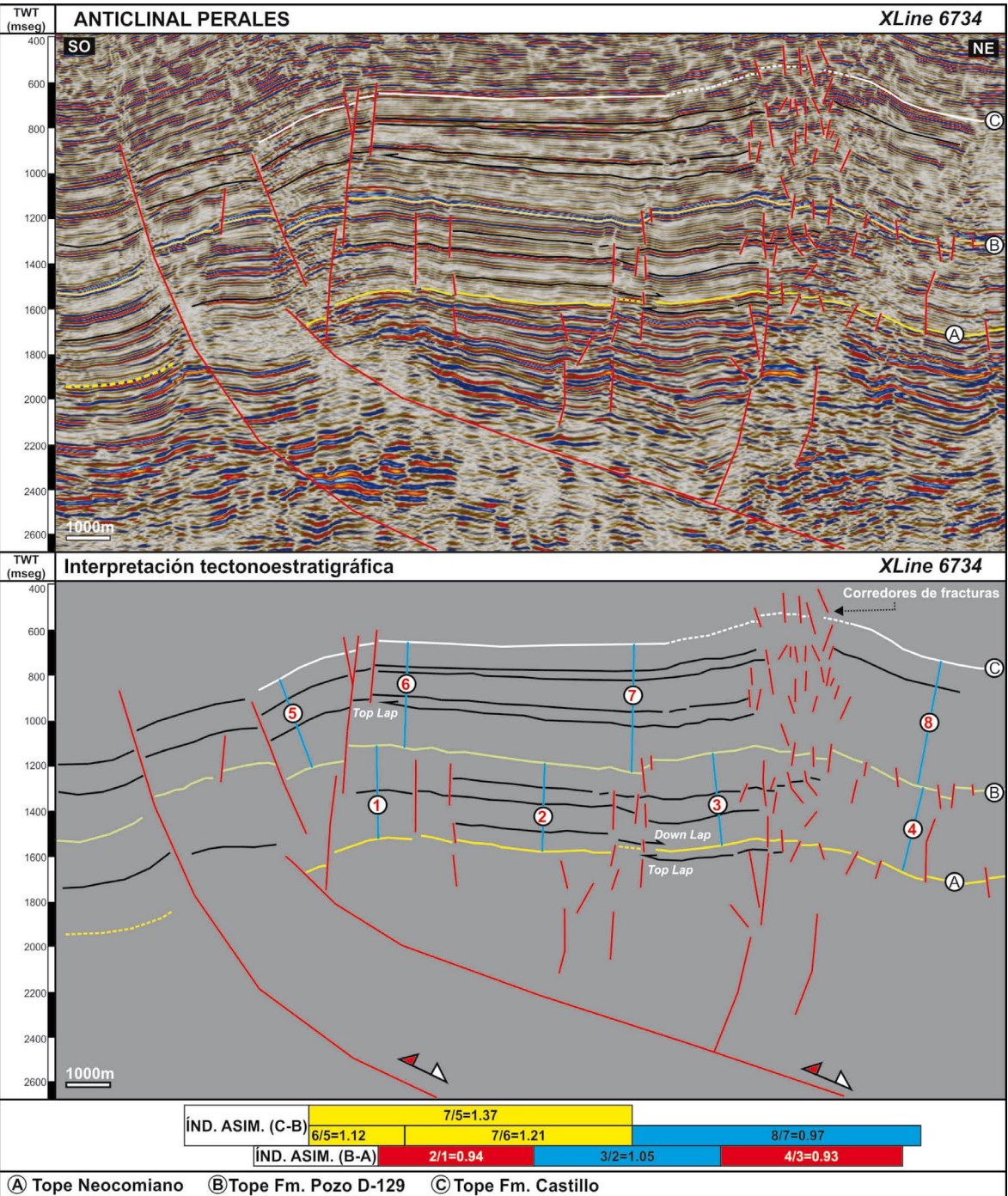


Figura 10. Sección sísmica XLine 6734, subparalela al eje del anticlinal Perales. Se indica la interpretación estructural y los reflectores del tope del Neocomiano (A), de la Fm. Pozo D-129 (B) y de la Fm. Castillo (C). El intervalo sismoestratigráfico de la Fm. Castillo (C-B) muestra un incremento del espesor hacia la cresta del braquianticinal, con divergencia de reflectores en esa dirección (notar índice de asimetría 7/5).

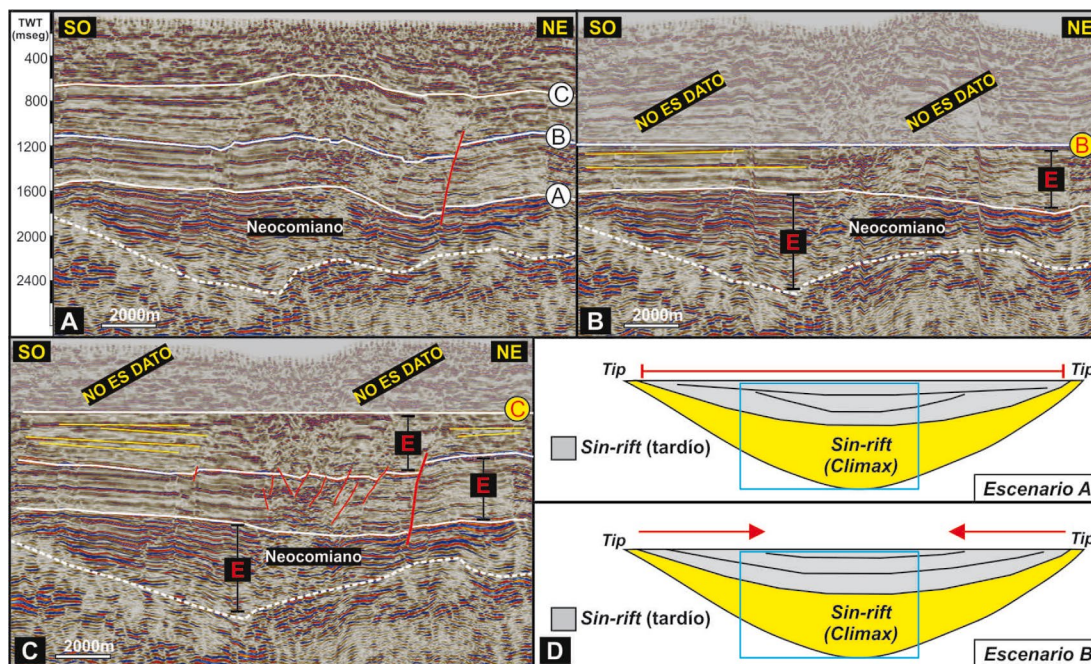


Figura 11. A) Sección sísmica paralela al rumbo de la falla Los Perales. Se indican los topes de las secuencias cretácicas según Figura 9 y en rojo una falla secundaria transversal. B y C) Evolución tectonoestratigráfica definida a partir de la horizontalización secuenciada al tope de la Fms. Pozo D-129 (B) y Castillo (C). Notar la migración lateral de los espesores máximos (E) de los distintos intervalos cretácicos. D) Esquemas de las discordancias de sin-rift tardío reconocidas en secciones longitudinales de fallas principales (basado en Morley 2002). Escenario A: Las discordancias se expanden (terminaciones top-lap) hacia el tip debido a que la falla decrece en actividad pero continúa activa en toda su extensión. El rectángulo celeste representa una posición equivalente a la sección sísmica XLine 6734. Escenario B: Las discordancias se desplazan hacia el centro de la falla debido a una contracción de la longitud de extensión.

DISCUSIÓN: MODELOS ESTRUCTURALES INTEGRADOS

Los resultados expuestos permiten la comparación de elementos estructurales de subsuelo y superficie para definir parámetros geométricos, cinemáticos y dinámicos de estructuras tectónicas en la Faja Plegada de San Bernardo. Las fallas principales vinculadas a los pliegues de SS y AP comparten características geométricas importantes para el análisis estructural. Ambas son de alto ángulo, sus dimensiones son similares, sus rumbos son subparalelos y se vinculan a lo largo del rumbo a otras fallas oblicuas de menor jerarquía. Las secciones transversales a los anticlinales de SS y AP definen pliegues de inversión caracterizados como pliegues no cilíndricos apretados, con geometría de charnela tipo semi-elipse a cajón y media longitud de onda de 4-5 km. El desarrollo de pliegues principales definidos por dos planos axiales convergentes es característico de pliegues cajón (Ramsay y Huber 1987), esta morfología específica fue atribuida a AP por Figari *et al.* (1999), al igual que a otros pliegues de la FPSB como Anticlinal Grande, Lomas del Cuy, Las Mesetas, Guadal, cerro Ballena y Los Manantiales. Interpretaciones estructurales análogas también habían sido realizadas previamente por Peroni *et al.* (1995). Estos análisis geométricos del plegamiento tienen importancia genética ya que los pliegues cajón se asocian a pliegues despegados (box folds y lif-off box folds sensu Mitra y Namson 1989). Sin embargo, el origen del plegamiento vinculado

al recizallado de estructuras previas (inversión tectónica) y la ausencia de niveles de despegue dúctiles como evaporitas descartan el desarrollo de pliegues despegados. En consecuencia, AP y SS se interpretan como pliegues conjugados con geometrías tipo kink definidas por dominios de inclinación y cambios abruptos de los mismos (Suppe 1985; Poblet 2012). El objetivo de la presente discusión es plantear y evaluar los modelos geométricos de pliegues asociados a fallas que mejor se ajusten a la información de superficie y de subsuelo obtenida de SS y AP.

Una característica muy importante para comprender la construcción de estos pliegues de inversión es la simetría entre el limbo frontal y dorsal, donde SS tiene una diferencia mínima definida por un flanco occidental $27^\circ/\text{N}299^\circ$ y uno oriental de $30^\circ/\text{N}74^\circ$ (Fig. 3). Esta arquitectura de ambos anticlinales se vincula al desarrollo de fallas antitéticas de menor jerarquía subparalelas a la principal, que definen geometrías tipo pop-up, similares a las descriptas por Peroni *et al.* (1995) y Figari *et al.* (1999). En este contexto, el monoclinal aflorado en SS es consecuencia de la deformación dúctil vinculada al pliegue por propagación de la falla inversa antitética. En ambos pliegues principales, estas fallas antitéticas afectan los limbos dorsales deformando las secuencias de la Fm. Castillo sin el desarrollo de discordancias progresivas ni estratos de crecimiento, lo cual sustenta un origen post-sedimentario a dicho intervalo estratigráfico (Poblet 2012). La macroarquitectura de los pliegues de inversión tectónica positiva de SS y AP difiere de muchos modelos y antecedentes clásicos de la literatura (ver ejemplos en Cooper y Williams 1989; Buchanan y Buchanan 1995). En estos se propone el desarrollo de pliegues amplios con una marcada asimetría, donde el flanco abrupto inclina hacia el plano de falla principal recizallado. Al mismo tiempo, las estructuras secundarias neoformadas durante la contracción pueden ser vergentes o retrovergentes, pero siempre son planos de bajo ángulo que responden a corrimientos cortos (shortcut thrust). En AP y SS se da el desarrollo de estructuras tipo pop up (McClay 1992) en secciones estructurales subparalelas al plano XZ, sustentando un sistema de fallas generadas por un régimen compresivo con deformación 3D. Esta arquitectura específica se ajusta a la geometría de pop-up growth folds propuesta por Cartwright (1989). Guzmán *et al.* (2008) reconocen un pop-up mediante la cartografía sísmica en el Bloque Barranca Yankowsky y le otorgan un origen transpresivo vinculado a la inversión tectónica de una falla neocomiana O-NO. Esta opción se consideró poco probable debido a la orientación subortogonal del rumbo de las fallas de AP y SS respecto del vector de acortamiento andino E-O definido en afloramiento (Fig. 7) y por contexto regional (Ramos 2015). Evidencias de transpresión en superficie (Paredes 2009) o contracción oblicua en subsuelo (Fig. 6) se interpretan como un efecto local vinculado a la partición de la deformación que permitió el desarrollo de una componente lateral de la deformación (ej. Imber *et al.* 2005). Bajo un régimen contraccional con deformación 3D subordinada o ausente, la arquitectura de falla invertida con un pliegue de inversión vinculado a un pop-up se asocia a una zona de transferencia contraccional entre ambas fallas. Este contexto cinemático es similar al modelo Tipo 1 de Higgins *et al.* (2007) para sistemas de corrimientos antitéticos parcialmente solapados. Respecto de este modelo, los casos de estudio

de AP y SS presentan sus particularidades, ya que se debe contemplar el desarrollo de dos fallas inversas antitéticas de distinta jerarquía totalmente solapadas. En este esquema, las fallas principales se vinculan a inversión tectónica positiva, mientras que las secundarias antitéticas a estas pueden tener dos posibles interpretaciones. I) Las fallas antitéticas de alto ángulo responden a estructuras andersonianas extensionales subparalelas a las fallas principales, las cuales fueron recizalladas durante la inversión tectónica (Sibson 1989). En esta hipótesis las fallas normales secundarias habrían sido post-sedimentarias respecto de la Fm. Castillo, y en consecuencia su recizallado no expone evidencias geométricas de actividad sinsedimentaria extensional (ej. estratos de crecimiento y discordancias progresivas). II) Los pliegues de inversión son de doble charnela y evolucionan a pliegues fallados a medida que avanza la contracción. En este modelo la falla antitética se orienta similar al plano axial del limbo dorsal (Ramsay y Huber 1987; Nemcok *et al.* 2009), mientras que la falla principal se proyecta heredando la geometría del plano extensional recizallado. En ambos modelos, el proceso de recizallado de fallas de alto ángulo en lugar del desarrollo de corrimientos cortos andersonianos habría sido favorecido por la presión de fluidos del sistema petrolero (Handin 1969; Sibson 1989; Sibson 2017), así como la disminución del coeficiente de fricción del plano de falla original (Handin 1969; Sibson 1995). La validación de alguna de las hipótesis propuestas deberá aguardar los resultados de nuevos análisis cinemáticos y de modelos estructurales análogos.

Desde el punto de vista tectonoestratigráfico, las evidencias de superficie en SS y del subsuelo en AP sustentan de forma robusta que el proceso de inversión tectónica tuvo lugar luego de la depositación de la Fm. Castillo, es decir que este evento es al menos post-albiano (Suarez *et al.* 2014). Este análisis contrasta respecto a la interpretación de Gianni *et al.* (2015a) en los mismos pliegues de inversión tectónica, donde sus figuras 7.B, 7.C y 10.B interpretan discordancias progresivas y estratos de crecimiento en las secuencias basales del Grupo Chubut (Fms. Castillo y Matasiete). Estos modelos estructurales son antagónicos y no admiten un consenso geométrico, cinemático, ni dinámico. Considerando las analogías superficie-subsuelo expuestas en esta contribución se revalida la evolución tectonoestratigráfica clásica de la FPSB, donde la inversión tectónica positiva es posterior a la depositación de la Fm. Castillo. El origen sin-inversión de los paleosuelos de la Fm. Laguna Palacios y de los depósitos fluviales de la parte alta de la Fm. Lago Colhué Huapi permiten proponer un ajuste del timing de la inversión al Cretácico Superior tardío (Allard *et al.* 2015b). Esta calibración está acorde a las evidencias fluviales obtenidas en afloramientos del anticlinal del codo del río Senguerr, las cuales sustentan que la Fm. Bajo Barreal es una unidad pre-inversión (Paredes *et al.* 2016). Los resultados expuestos de SS y AP plantean la necesidad de una revisión, reevaluación y calibración de la información de base que sustenta muchos modelos geodinámicos actuales, donde la fase de contracción andina en la CGSJ se inicia en el Cretácico Inferior tardío (ej. Gianni *et al.* 2015b, Navarrete *et al.* 2015; 2016; Horton 2018). Los pulsos contraccionales que deforman el Gr. Chubut en el cenozoico en la FPSB no son objeto de esta contribución, aquellos interesados pueden revisar Paredes *et al.* (2006) y Gianni *et al.* (2017).

CONCLUSIONES

La sierra Silva y el Anticlinal Perales son pliegues de inversión tectónica positiva que comparten características geométricas y cinemáticas. Su arquitectura actual se caracteriza por definir pliegues apretados vinculados a estructuras tipo Pop Up generadas por una falla principal invertida y una falla inversa secundaria, definiendo geometrías tipo Pop Up Growth-Folds. Estas geometrías difieren considerablemente de los clásicos ejemplos y modelos de pliegues de inversión tectónica. En este escenario, el carácter sin-extensional de la falla secundaria no es una condición excluyente, por lo cual las evidencias de recizallado deberán ser evaluadas en futuros modelos cinemáticos. En ambos pliegues, las fallas oblicuas a la estructura principal se interpretan como fallas normales cretácicas, recizalladas con componente lateral y de inclinación durante el evento de inversión tectónica que construyó los pliegues. Los sistemas de fallas transversales heredados de la etapa extensional tuvieron un rol fundamental para desarrollar corredores de fracturas que podrían haber funcionado como vías de migración del sistema petrolero. Estas zonas se habrían combinado con los sistemas de fracturas subsísmicos otorgando una compleja distribución de vías de migración y sellos en el sistema roca-fluido.

El análisis tectonoestratigráfico de subsuelo en AP define que tanto la falla principal como las secundarias presentan reactivación extensional durante la depositación de la Fm. Castillo. Desde el afloramiento, el extremo norte de SS expone la sección basal de la Fm. Castillo como secuencias tabulares sin desarrollo de discordancias progresivas ni estratos de crecimiento. Este patrón de superficie sustenta la falta de control tectónico local durante su depositación, marcando una importante diferencia cinemática respecto a AP. El carácter sin y post extensional de los depósitos de la Fm. Castillo en AP y SS respectivamente, demuestra que los análisis cinemáticos deben ser realizados en cada estructura principal y no ser extrapolados de un contexto geodinámico general. La reactivación extensional de estructuras principales de la FPSB como AP durante las secuencias basales del Grupo Chubut se considera un control de primer orden para evaluar los patrones de apilamiento locales de cuerpos canalizados (reservorios) así como la batimetría del sistema lacustre de la Fm. Pozo D-129 (reservorios y roca madre).

AGRADECIMIENTOS

Los autores de esta contribución agradecen a las autoridades de YPF S.A. por permitir difundir la información de subsuelo. Los comentarios y sugerencias de un revisor anónimo mejoraron sustancialmente el manuscrito original. Se agradece al señor Mauro Jerez por su hospitalidad y por permitir el acceso a los afloramientos de la sierra Silva.

REFERENCIAS CITADAS

- Allard, J.O., N. Foix, J.M. Paredes, A. Rodriguez, F. Sánchez y R.E. Giacosa, 2016, "Análisis estructural comparado entre Sierra Silva y Sierra Nevada (Cuenca del Golfo San Jorge): Implicancias para los modelos de inversión tectónica positiva", en J.M. Paredes, N. Foix y J.O. Allard (eds.), Segundas Jornadas Geológicas de la Cuenca del Golfo San Jorge, actas digitales, p. 21-22, Comodoro Rivadavia, Argentina.
- Allard, J.O., N. Foix, J.M. Paredes, A. Rodriguez y F. Sánchez, 2015a, "Modelo estructural para la construcción de Sierra Silva (Cuenca del Golfo San Jorge, Patagonia)", XVI Reunión de Tectónica, p. 120-121, General Roca, Argentina.
- Allard, J.O., N. Foix, G. Casal y A. Rodriguez, 2015b, "Sobre el contexto tectonoestratigráfico de las formaciones Laguna Palacios y Lago Colhue Huapí (Grupo Chubut, Cretácico Superior), cuenca del Golfo San Jorge, Patagonia", XVI Reunión de Tectónica, p. 118-119, General Roca, Argentina.
- Allard, J.O., N. Foix y S.A. Bueti, 2017, "Nuevo hallazgo de la Formación Pozo D-129 en el anticlinal del cerro Kepi (sierra Silva, Cuenca del Golfo San Jorge): paleoambiente, estratigrafía y controles externos", XX Congreso Geológico Argentino Actas, p. 1-6. Tucumán, Argentina.
- Allmendinger, R.W., 2015, "Modern structural practice. A structural geology manual for the 21st century", 291 p.
- Atencio, M., J. Edelvais, Y. Basile, S. Utgé, y F. Späth, 2015, "Geomorfología sísmica de la última transgresión lacustre de la Formación Pozo D-129 en la región de la Faja Plegada, cuenca del Golfo San Jorge", Revista de la Asociación Geológica Argentina 72, 1, p. 136-147.
- Barcat, C., J. Cortiñas, V. Nevistic y H. Zucchi, 1989, "Cuenca Golfo San Jorge", en G. Chebli y L.A. Spalletti (eds.), Cuencas Sedimentarias Argentinas, Universidad Nacional de Tucumán, Serie Correlación Geológica 6, p. 319-345, San Miguel de Tucumán, Argentina.
- Buchanan, J.G. y P.G. Buchanan, 1995, "Basin Inversion", Geological Society Special Publication, N° 88, The Geological Society, 596 p.
- Bueti, S.A., J.O. Allard y N. Foix, 2017, "Arquitectura estructural de la sierra Silva, Faja Plegada de San Bernardo (Cuenca del Golfo San Jorge): implicancias para el timing del broken foreland andino-patagónico" XX Congreso Geológico Argentino, Actas S12 p. 48-53, San Miguel de Tucumán, Argentina.
- Cartwright, J.A., 1989, "The kinematics of inversion in the Danish Central Graben", en: Inversion Tectonics, M.A. Cooper y G.D. Williams (eds.). Geological Society Special Publication Classics, p. 153-175.
- Clark I.R. y J.A. Cartwright, 2012, "A case study of three-dimensional fold and growth sequence development and the link to submarine channel-structure interactions in deep-water fold belts", en D. Geo (ed.), Tectonics and sedimentation: implications for petroleum systems. America Association of Petroleum Geologists Memoir 100, p. 315-335.
- Contreras, J. y C.H. Scholz, 2001, "Evolution of stratigraphic sequences in multisegmented continental rift basins: Comparison of computer models with the basins of the East African rift system", America Association of Petroleum Geologists Bulletin 85, 9, p. 1565-1581.

- Cooper M.A. y G.D. Williams, 1989, "Inversion Tectonics". Geological Society Special Publication Classics, M. A. Cooper & G.D. Williams (Eds.), The Geological Society London, 375 p.
- Destro, N., 1995, "Release fault: a variety of cross fault in linked extensional fault systems in the Sergipe-Alagoas basin, northeast Brazil", *Journal of Structural Geology* 17, p. 615-629.
- Destro, N., P. Szatmary, F.F. Alkmim, y L.P. Magnavita, 2003, "Release faults, associated structures, and their control on petroleum trends in the Reconcavo rift, northeast Brazil", *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 87, p. 1123-1144.
- Figari, E., E. Strelkov, G. Laffitte, M. Cid de la Paz, S. Courtade, J. Celaya, A. Vottero, S. Lafourcade, R. Martinez, y H. Villar, 1999, "Los sistemas petroleros de la Cuenca del Golfo San Jorge: Síntesis estructural, estratigráfica y geoquímica", IV Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Actas, p. 197-237, Buenos Aires, Argentina.
- Fitzgerald, M.G., R.M. Mitchum, M.A. Uliana y K.T. Biddle, 1990, "Evolution of the San Jorge Basin, Argentina", *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 74, 6, 879-920.
- Fossen, H., "Structural Geology", Cambridge University Press, 463 p.
- Giacosa, R. y J.M. Paredes, 2008, "La sierra de San Bernardo. Secretos del subsuelo", en *Sitios de Interés Geológico* 2, Servicio geológico minero argentino (SEGEMAR), p. 46-719.
- Gianni, G.M., C.G. Navarrete, D. Orts, J. Tobal, A. Folguera y M. Giménez, 2015 (a), "Patagonian broken foreland and related synorogenic rifting: The Origin of the Chubut Group Basin", *Tectonophysics* 649, p. 81-99.
- Gianni G.M., C.G. Navarrete y A. Folguera, 2015 (b), "Synorogenic foreland rifts and transtensional basins: A review of Andean imprints on the evolution of the San Jorge Gulf, Salta Group and Taubaté Basins", *Journal of South American Earth Sciences* 64, 2, p. 288-306.
- Gianni G.M., A. Folguera y C.G. Navarrete, 2016, "The North Patagonian Orogen: Meso-Cenozoic Evolution from the Andes to the Foreland Area", en: A. Folguera, M. Naipauer, L. Sapripanti, M.C. Ghiglione, D.L. Orts, L. Giambiagi (Eds.), *Growth of Southern Andes*, p. 173-200.
- Gianni, G.M., A. Echaurren, A. Folguera, A. Likerman, A. Encinas, H.P.A. García, C. Dal Molin, V.A. Valencia, 2017, "Cenozoic intraplate tectonics in Central Patagonia: Record of main Andean phases in a weak upper plate", *Tectonophysics* 721, p. 151-166.
- Groshong, R.H. Jr., 2006, "3-D Structural Geology. A Practical Guide to Quantitative Surface and Subsurface Map Interpretation", Second Edition, Springer Berlin Heidelberg, 393 p. New York, USA.
- Guzmán, C.G., V.H. García, D.L. Yagupsky y E.O. Cristallini, 2008, "Análisis estructural y tectónico del bloque Barranca Yankowsky, cuenca del Golfo San Jorge", Informe Interno, Repsol-YPF (Inédito), 56 p.
- Handin, J., 1969, "On the Coulomb-Mohr failure criterion", *Journal of Geophysical Research* 74, p. 5343-5348.
- Hechem, J.J., 2015, "Cien años de modelos geológicos en la cuenca del Golfo San Jorge", *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 72, 1, p. 1-11.
- Herron, D.A., 2011, "First steps in seismic interpretation", *Geophysical monograph series* 16, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, 203 p.

- Higgins, S., R.J. Davies y B. Clarke, 2007, "Antithetic fault linkages in a deep water fold and thrust belt", *Journal of Structural Geology* 29, p. 1900-1914.
- Homovc, J.F., G.A. Conforto, P.A. Lafourcade y L.A. Chelotti, 1995, "Fold belt in the San Jorge Basin, Argentina: an example of tectonic inversion", en: J.G. Buchanan y P.G. Buchanan (eds.), *Basin Inversion*, Geological Society of London, Special Publication, 88, p. 235-248.
- Horton, B.K., 2018, "Tectonic regimes of the Central and Southern Andes: Responses to variations in the plate coupling during subduction", *Tectonics*, DOI: 10.1002/2017TC004624
- Imber, J., R.E. Holdsworth, K.J.W. McCaffrey, R.W. Wilson, R.R. Jones, R.W. England y G. Gjeldvik, 2005, "Early Tertiary sinistral transpression and fault reactivation in the western Voring Basin, Norwegian Sea: Implications for hydrocarbon exploration and pre-breakup deformation in ocean margin basins", *American Association of Petroleum Geologist Bulletin* 89, 8, p. 1043-4069.
- Keller, V.C., 1955, "Monoclines of the Colorado Plateau", *Bulletin of the Geological Society of America* 66, p. 789-804.
- Marret, R. y R.W. Allmendinger, 1990, "Kinematic analysis of fault-slip data", *Journal of Structural Geology* 12, 8, p. 973-986.
- McClay, K.R., 1992, "Glossary of thrust tectonics terms", en K.R. McClay (ed), *Thrust Tectonics*, Chapman & Hall, 447 p.
- Mitra S.y J. Namson, 1989, "Equal-area balancing", *American Journal of Science*, 289, p. 563-599.
- Mitra, S., 1993, "Geometry and kinematic evolution of inversion structures", *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 77, 7, p. 1159-1191.
- Morley, C.K., 1995, "Developments in the structural geology of rifts over the last decade and their impact on hydrocarbon exploration" en: J. Lambiase (Ed.), *Hydrocarbon habitat in rift basins*, Geological Society of London, Special Publication 80, p. 1-32.
- Morley, C.K., 1999, "Patterns of Displacement Along Large Normal Faults: Implications for Basin Evolution and Fault Propagation, Based on Examples from East Africa" *American Association of Petroleum Geologist Bulletin* 83, 4, p. 613-634.
- Morley, C.K., 2002, "Evolution of large normal faults: Evidence from seismic reflection data", *American Association of Petroleum Geologist Bulletin* 86, 6, p. 961-978.
- Morley, C.K., P. Vanhauwaert, M. De Batist, 2000, "Evidence for high-frequency cyclic fault activity from high-resolution seismic reflection survey, Rukwa Rift, Tanzania", *Journal of the Geological Society of London* 157, p. 983-994.
- Müller R.D., M. Seton, S. Zahirovic, S.E. Williams, K.J. Matthews, N.M. Wright, G.E. Shephard, K.T. Maloney, N. Barnett-Moore, M. Hosseinpour, D.J. Bower y J. Cannon, 2016, "Ocean basin evolution and global-scale plate reorganization events since Pangea breakup", *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 44, p. 38-107.
- Navarrete, C.R., G.M. Gianni y A. Folguera, 2015, "Tectonic inversion events in the western San Jorge Gulf Basin from seismic, borehole and field data", *Journal of South American Earth Sciences* 64, 2, p. 486-497.
- Nemcok M., S. Schamel, R. Gayer, 2009, "Thrust-belts: Structural Architecture, Thermal Regimes and Petroleum Systems", Cambridge University Press. 556 p.

- Paredes, J.M., N. Foix y J.O. Allard, 2016, "Sedimentology and alluvial architecture of the Bajo Barreal Formation (Upper Cretaceous) in the Golfo San Jorge Basin: Outcrop analogues of the richest oil-bearing fluvial succession in Argentina", *Marine and Petroleum Geology* 72, p. 317-335.
- Paredes, J.M., M. Aguiar, A. Ansa, S. Giordano, M. Ledesma y S. Tejeda, 2018, "Inherited discontinuities and fault kinematics of a multiphase, noncolinear extensional setting: Subsurface observations from the South Flank of the Golfo San Jorge basin, Patagonia", *Journal of South American Earth Sciences* 81, p. 87-107.
- Paredes, J.M., 2009, "Sedimentary Evolution of the Golfo San Jorge Basin, Central Patagonia, Argentina", en L.M. Ibañez, M.S. Moyano y G.F. Aceñolaza (eds.), *Argentinean Fluvial Basins: Ancient and present day examples*, Excursion Guide Book, IX International Conference on Fluvial Sedimentology, p. 187-275, San Miguel de Tucumán, Argentina.
- Paredes, J.M., G. Azpiroz y N. Foix, 2006, "Tertiary tectonics and sedimentation in the Cerro Piedra Oil Field Golfo San Jorge basin, Argentina", IV Latin American Congress of Sedimentology, Abstract, p. 163, San Carlos de Bariloche, Argentina.
- Paredes, J.M., J.O. Allard, N. Foix, B. Álvarez y S. Olazábal, 2014, "Sedimentología y perfiles de rayos gamma de la Formación Pozo D-129 (Aptiano) en la Sierra de San Bernardo, Chubut", IX Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, p. 455-479 Mendoza, Argentina.
- Paredes, J.M., N. Foix y J.O. Allard, 2011, "Sedimentología de la Formación Pozo D-129 en el Yacimiento Estancia Cholita, Cuenca del Golfo San Jorge", Informe Inédito YPF, 55 p.
- Peroni, G., A. Hegedus, J. Cerdan, L. Legarreta, M. Uliana y G. Laffite, 1995, "Hydrocarbon accumulation in an inverted segment of the Andean Foreland: San Bernardo Belt, Central Patagonia", en A. Tankard, R.Y. Suarez, H. Welsink (eds.), *Petroleum Basins of South America*, American Association of Petroleum Geologist Memoir, 62, p. 403-419.
- Poblet, J., 2012, "2D kinematic models of growth fault-related folds in contractional settings", en C. Busby y A. Azor (eds.), *Tectonics of Sedimentary Basins: Recent Advances*, p. 358-564.
- Prosser, S., 1993, "Rift-related linked depositional systems and their seismic expression", en: G.D. Williams y A. Dobb (eds.), *Tectonics and Seismic Sequence Stratigraphy*, Geological Society Special Publication 71, p. 35-66.
- Ramos, V.A., 2015, "Evolución de la cuenca del Golfo San Jorge: su estructuración y régimen tectónico", *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 72, 1, 12-20.
- Ramsay J.G. y M.I. Huber, 1987, "The Techniques of Modern Structural Geology. Volume 2: Folds and Fractures", Academic Press, 700 p.
- Riba, O., 1976, "Syntectonic unconformities of the Alto Cardener, Spanish Pyrenees: a genetic interpretation", *Sedimentary Geology* 15, p. 213-233.
- Rodríguez, J.F.R. y R. Littke, 2001, "Petroleum generation and accumulation in the Golfo San Jorge Basin, Argentina: a basin modeling study", *Marine and Petroleum Geology* 18, 995-1028.
- Schlische, R.W., 1991, "Half-graben basin filling models: new constraints on continental extensional basin development", *Basin Research* 3, p. 123-141.
- Sciutto, J.C., 1981, "Geología del codo del río Senguerr, Chubut, Argentina", VIII Congreso Geológico Argentino, Actas 3, p. 203-219, San Luis, Argentina.

- Sibson, R.H., 1989, "High-angle reverse faulting in northern New Brunswick, Canada, and its implications for fluid pressure levels", *Journal of Structural Geology* 11, 7, p. 873-877.
- Sibson, R.H., 1995, "Selective fault-reactivation during basin inversion: potential for fluid redistribution through fault-valve action", en: J.G. Buchanan y P.G. Buchanan, (eds.), *Basin Inversion*, Geological Society Special Publication, 88, p. 3-20.
- Sibson, R.H., 2017, "The edge of failure: critical stress overpressure states in different tectonic regimes", en: J.P. Turner, D. Healy, R.R. Hillis y M.J. Welch (eds.), *Geomechanics and Geology*, Geological Society, London, Special Publications 458, p. 131-141.
- Stach, N. 1986, "Fotointerpretación de la zona comprendida entre Cerro Ferrarotti, Cañadón Grande y el Codo del Senguier" Informe interno YPF (inédito).
- Suárez, M., M. Márquez, R. De La Cruz, C. Navarrete, M. Fanning, 2014, "Cenomanian-? Early Turonian minimum age of the Chubut Group, Argentina: SHRIMP U-Pb geochronology", *Journal of South America Earth Science* 50, p. 67-74.
- Suppe, J., 1985, "Principles of Structural Geology", Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, N.J., 560 p.
- Suppe, J., G. Chou y S. Hook, 1991, "Rates of folding and faulting determined from growth strata", en K. McClay (ed.) *Thrust Tectonics*, Chapman & Hall, p. 105-121, London, U.K.
- Sylvan, C., C. Droeven, J. Iñigo, F. Mussel y D. Padva, 2011, "Cuenca del Golfo San Jorge" VIII Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Simposio Cuencas Argentinas: visión actual, p. 139-183.
- Twiss, R.J. y E.M. Moores, 1992, "Structural Geology", Freeman, 532 p., New York, U.S.A.
- Uliana, M.A., M.E. Arteaga, L. Legarreta, J.J. Cerdán y G.O. Peroni, 1995 "Inversion structures and hydrocarbon occurrence in Argentina", en: J.G. Buchanan y P.G. Buchanan (eds.), *Basin Inversion*, Geological Society of London, Special Publication, 88, p. 211-233.
- Van der Pluijm, B.A. y S. Marshak, 2004, "Earth Structure", W.W. Norton & Company., New York, U.S.A., 656 p.
- Withjack, M.O., R.W. Schlische y P. Olsen, 2002, "Rift-basin structure and its influence on sedimentary systems", en: R. Renault y G. Ashley (eds.), *Sedimentation in Continental Rifts*, SEPM Special Publication 73, p. 57-81.
- Zeng, H., 2007, "Seismic imaging for seismic geomorphology beyond the seabed: potentials and challenges", en: R.J. Davies, H. Posamentier, L. Wood y J.A. Cartwright (eds.), *Seismic Geomorphology: Applications to Hydrocarbon Exploration and Production*, Geological Society of London, Special Publication, 277, p. 15-28.