

CARACTERIZACIÓN DE LA SERIE TOBÍFERA EN EL ÁMBITO DEL BLOQUE LAGO FUEGO, TIERRA DEL FUEGO, ARGENTINA

María Juliana Continanzia¹, Francisco Nicolás Seoane¹, María Alejandra Feinstein²,
Karina Mykietiuik¹, Ramiro Gabriel López¹, Mario Atencio¹

1: YPF S.A. maria.continanzia@ypf.com, francisco.seoaneborracer@ypf.com,
karina.mykietiuik@ypf.com, ramiro.lopez@ypf.com, mario.atencio@ypf.com

2: alejandrafeinstein@gmail.com

Palabras clave: Serie Tobífera, Complejo Volcánico, Caracterización, Fracturas Naturales

ABSTRACT

The Lago Fuego field was discovered in 1989 by Occidental Petroleum (OXI) during the exploration of the Río Grande Sur Block. Until 2016, the main objective was the Springhill Formation. Below this productive sandstone, there is a volcanic and volcanoclastic complex called Serie Tobífera, which was historically considered as the economic basement. Based on the 2016 drilling campaign results, this unit became a primary target alongside Springhill Formation.

This paper is aimed at showing how the integration of different tools and techniques made it possible to move forward in the state of knowledge of the Serie Tobífera in the Lago Fuego Block. To perform the rocks characterization, well logs - including nuclear, resistive, acoustic and magnetic tools analysis- were complemented with core data, side well cores and cutting. Furthermore, macroscopic descriptions focused on rock textures were critical for the volcanic succession characterization. Thin sections, laboratory petrophysical studies, scanning electron microscopy and chemical facies were also performed.

The data set allowed us to identify different genesis and composition of rock bodies. Due to the importance of natural fractures in these low porosity and permeability reservoirs, their description and characterization were also included as part of the studies.

These results and the identification of the tectonic events in this area, enabled the development of a predictive prospective model that includes mechanical facies and fracture intensity grids. These outcomes helped in decreasing the uncertainty of new prospects.

INTRODUCCIÓN

El yacimiento Lago Fuego está ubicado en la Isla Grande de la provincia de Tierra del Fuego, Antártida e Islas del Atlántico Sur en la Cuenca Austral, 35 km al sur de la ciudad de Río Grande, en el Área de Concesión homónima de 546 km² de extensión. Dicho yacimiento fue descubierto por la compañía OXY en 1989 durante el inicio de la exploración del Bloque Río Grande Sur.

Hasta el año 2016, el objetivo principal lo constituyeron las areniscas de la Fm. Springhill. Por debajo de esta unidad productiva se encuentra un complejo volcánico y volcanoclástico de edad Jurásica media a superior, denominado Serie Tobífera (Gust *et al.* 1985, entre otros) (Fig. 1).

Dicho complejo fue considerado históricamente como el basamento económico del área. Si bien esta unidad presentó saturación de gas durante la perforación del pozo LF.x-1 (descubridor de la Fm. Springhill) y manifestaciones durante la perforación del LF.a-2 (Lago Fuego), no había alcanzado productividades económicamente importantes. A partir de los resultados obtenidos en los pozos realizados en la campaña 2016, esta unidad se convirtió en un objetivo primario junto a la Fm. Springhill.

Al avanzar con el desarrollo de la Serie Tobífera, los resultados de producción alcanzados fueron disímiles, a partir de lo cual se decidió capturar nueva información que permitiese caracterizar mejor la complejidad de este tipo de reservorio. El objetivo del presente trabajo es mostrar cómo la integración de diferentes herramientas y técnicas permitió avanzar en el estado de conocimiento de la Serie Tobífera en el ámbito del Bloque Lago Fuego.

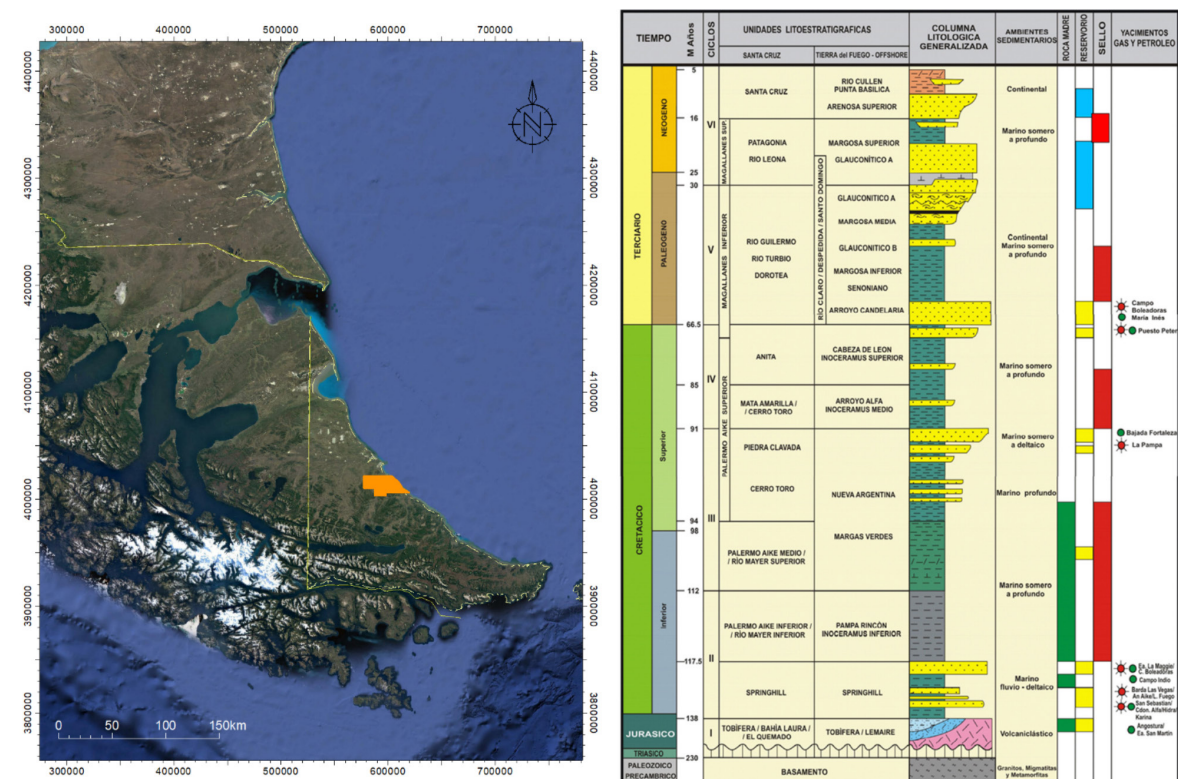


Figura 1. Mapa de ubicación y columna litológica en el área de estudio (modificada de Cortiñas y Hlebszevitch 2005).

INTERPRETACIÓN SÍSMICA

Dentro de los límites de Lago Fuego hay registrados aproximadamente 462 km² de sísmica 3D que cubren el área de estudio en su totalidad y forman parte del cubo sísmico homónimo adquirido en 2008 por la compañía Apache (Fig. 2). Los principales niveles estratigráficos de interés en el área se encuentran interpretados como horizontes [TWT] y grillados como superficies cronoestratigráficas

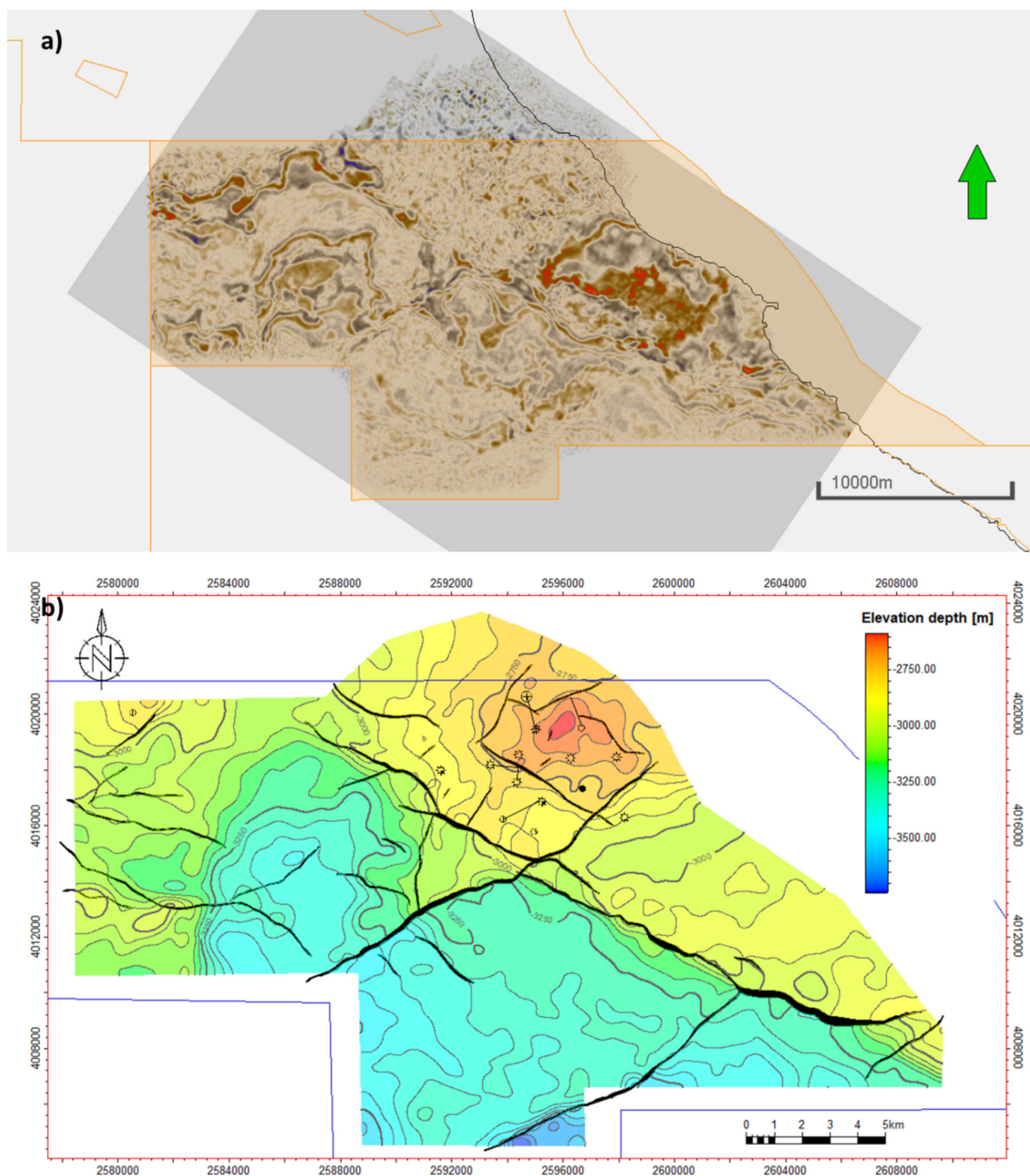


Figura 2. a) Cobertura sísmica de Lago Fuego. b) Mapa estructural al tope de la Fm Springhill.

(grillas 50x50). Las mismas fueron convertidas al dominio de la profundidad mediante la aplicación de un modelo de velocidades en el área. Todas las superficies fueron interpretadas en Amplitud en la clase sísmica *Pre-Stack Time Migration* (PSTM), y corresponden a reflectores continuos con carácter sísmico variable en función de su localización en el área. Todas ellas, a excepción de “Basamento” fueron guiadas por marcadores geológicos observables en registros de pozo.

Se realizaron varios ejercicios de visualización e interpretación de atributos sísmicos, entre los cuales se pueden mencionar la identificación de patrones sísmicos, la realización de cubos de impedancia P, atributos estructurales, análisis de amplitudes y descomposición espectral. Estos ejercicios permitieron identificar la existencia de anomalías sísmicas asociadas a discontinuidades (Atencio *et al.* 2018).

El bloque se caracteriza por presentar una falla normal de orientación ONO-ESE, con buzamiento al SO, cuyo bloque yacente conforma un alto estructural con cierre en 4 direcciones donde se desarrolla el yacimiento Lago Fuego. Otro conjunto de fallas directas de orientación OSO-ENE y buzamiento al SE subdivide al área de estudio. Los rechazos de las fallas principales se aproximan a los 100 metros, valor estimado mediante modelado de velocidades (Fig. 2).

FACIES Y PETROFÍSICA

En los recortes de perforación de los pozos del bloque Lago Fuego, la Serie Tobífera usualmente ha sido descripta como toba en la totalidad del intervalo investigado. Los perfiles eléctricos de pozo manifestaban variaciones importantes que no eran reflejadas en la descripción de *cutting*, por lo cual fue de suma importancia contar con muestras de corona y testigos laterales rotados (TLR) que permitieron describir las texturas presentes e identificar las litologías correspondientes. Para realizar la caracterización de las rocas presentes, se contó con la combinación de datos de coronas, TLR y *cutting*. Se realizaron descripciones macroscópicas, secciones delgadas, estudios petrofísicos de laboratorio, microscopía de barrido electrónico y quimiofacies.

Las descripciones litológicas de las coronas (YPF-LCV) identificaron asociaciones de facies que resultaron diagnósticas para la interpretación ambiental. Estas facies pueden dividirse en dos grandes grupos: rocas volcánicas cohesivas, cuya facies predominante es lava fenodacítica a fenoandesítica y rocas volcaniclásticas, como *block and ash* (de composición fenoandesítica) y tobas de caída (vitrofiro). No se observaron en las muestras macroscópicas rocas volcanogénicas (volcánicas retrabajadas) (Fig. 3). Tanto las facies explosivas como las efusivas presentan un alto grado de alteración hidrotermal.

Las porosidades en todas las facies medidas en laboratorio (RCLAB), arrojan valores que varían entre un 1 y un 10%. Las mismas en general se muestran con distribución heterogénea, en poros intracristalinos (asociados principalmente a disolución de fenocristales), en cristales fracturados, en poros intercristalinos y microporosidad en arcillas. Los rangos de tamaño poral

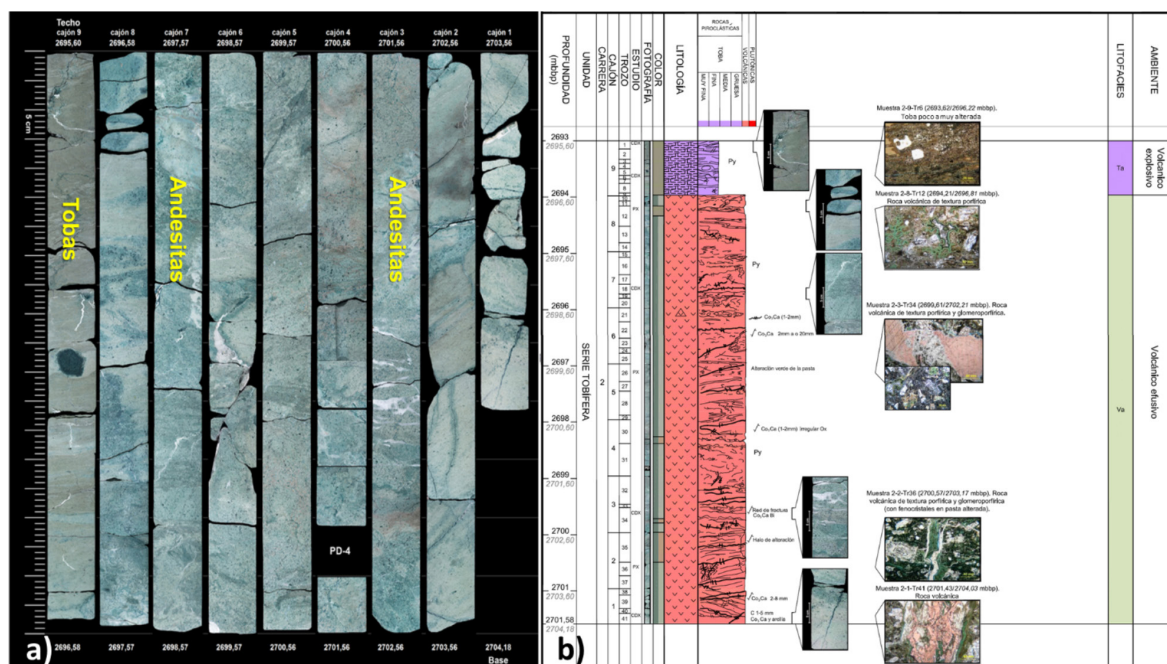


Figura 3. a) Corona Serie Tobífera. b) perfil Selley con fotografías macroscópicas y microscópicas ejemplificando las facies descriptas. Modificado de LCV (2018 a y b).

medidos también son variables, donde el tamaño poral dominante es de una microporosidad del orden de 1 micrón, siendo muy escasos los tamaños del orden de los 3 micrones. En cuanto al origen de esta porosidad, la misma es principalmente secundaria debido a disolución de las pastas o matrices vítreas y por microfisuras, con una escasa porosidad intracristalina e intrapartícula por disolución parcial en cristales y componentes vítreos (trizas). Siguiendo el esquema propuesto por Nelson (2001), el reservorio se interpreta como naturalmente fracturado Tipo II, en los cuales la presencia de fracturas naturales es la responsable de la permeabilidad del reservorio, mientras que la porosidad y por lo tanto el almacenaje, es producto de la combinación del aporte que brindan fracturas naturales y matriz.

FRACTURAS NATURALES

Habiendo observado las bajas porosidades y permeabilidades medidas en coronas y TLR, las fracturas naturales pasan a tener un papel predominante en la producción y reservorio de hidrocarburos. Debido a ello, se decidió realizar un estudio integrando la información obtenida en coronas y en imágenes de pozo. La descripción de las fracturas naturales se realizó sobre las coronas existentes en el área siguiendo la metodología desarrollada por el Consorcio FRAC (*Fracture Research and Application Consortium, Bureau of Economic Geology*) de la Universidad de Texas (*Structural Diagenesis Initiative*, 2018). Se capturó información de las principales características como morfología del plano de fractura, inclinación, terminaciones, tipo y grado de cementación,

relaciones de corte, mediciones de apertura total y apertura efectiva, entre otras. Estas observaciones permitieron inferir el proceso que dio origen a estas fracturas. Es así como en las coronas pudieron diferenciarse aquellas fracturas generadas por tectonismo de aquellas generadas por enfriamiento.

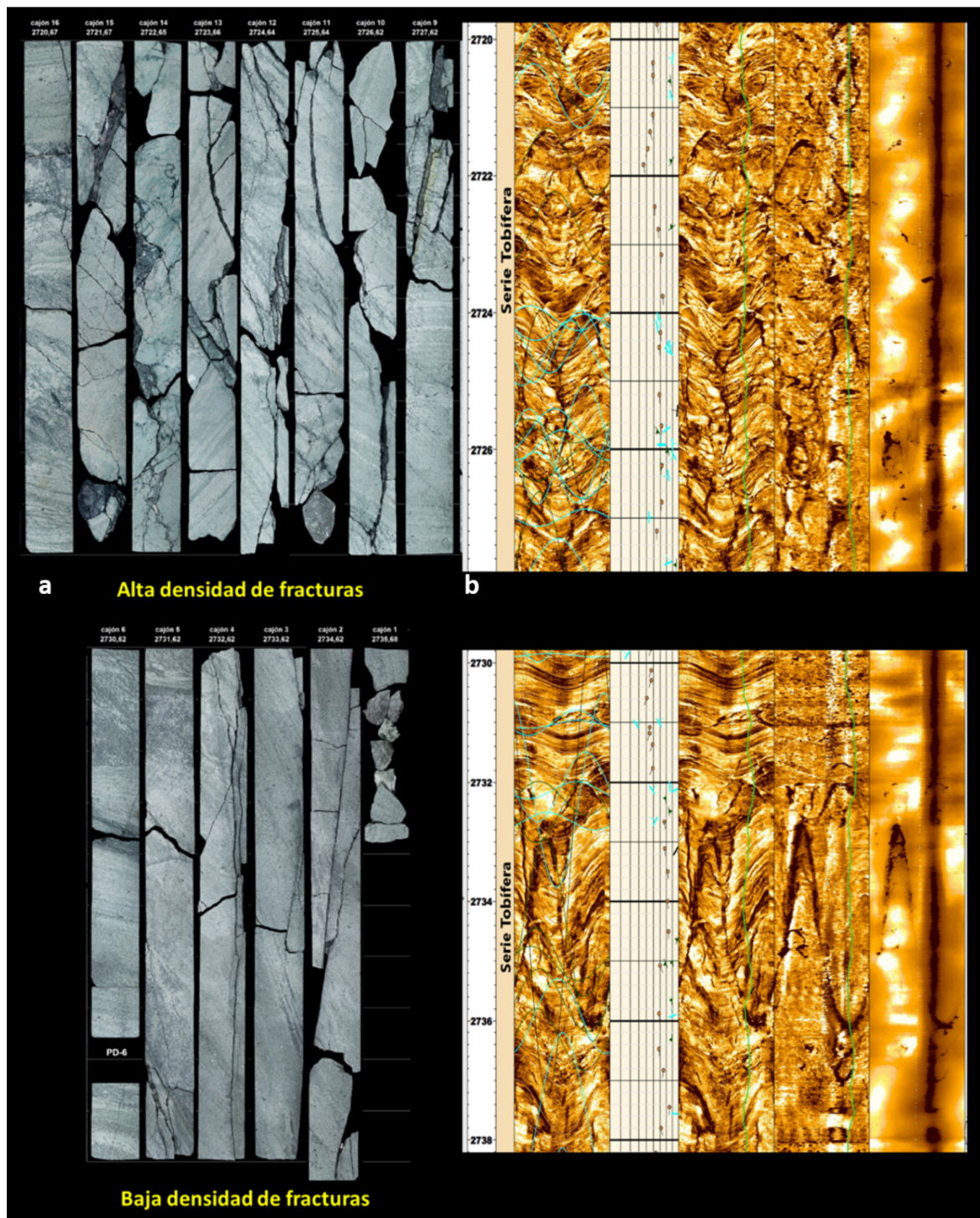


Figura 4. Variaciones en la intensidad de fracturas naturales identificadas en pozo (a: fotografías de coronas, b: imágenes de pozo registradas en los intervalos correspondientes a las coronas).

Esta diferenciación es importante para determinar el mecanismo de modelado que debe utilizarse (Lopez *et al.* 2018).

Las fracturas definidas se pueden dividir en dos grandes grupos: fracturas tectónicas (que posteriormente fueron modeladas en una plataforma de interpretación y modelado) y fracturas térmicas (que no fueron incorporadas en el modelo). Una de las observaciones destacables tanto en coronas como en las imágenes de pozo es que las fracturas verticales tienden a aumentar su angularidad a medida que se profundiza el pozo. También se observaron variaciones de las particularidades de las fracturas entre las distintas facies (Fig. 4).

En la Figura 5 se muestra la respuesta de distintas herramientas de perfilaje utilizadas en la caracterización de la Serie Tobífera, junto con la interpretación de los registros de imagen de pozo y algunos parámetros obtenidos del control geológico (Simonetto 2018). La interpretación de las imágenes de pozo acústicas y resistivas permitió identificar características estructurales, sedimentarias y geomecánicas, como la interpretación de fracturas naturales, zonas de alteración y brechas, posibles zonas de fallas, capas deformadas, fracturas inducidas por la perforación y *breakouts*. Mediante estos últimos y las fracturas inducidas se determinó la orientación de los esfuerzos máximo y mínimo horizontales actuales. A su vez, la ocurrencia de *breakouts* se utilizó para calibrar las estimaciones de las magnitudes del esfuerzo máximo horizontal.

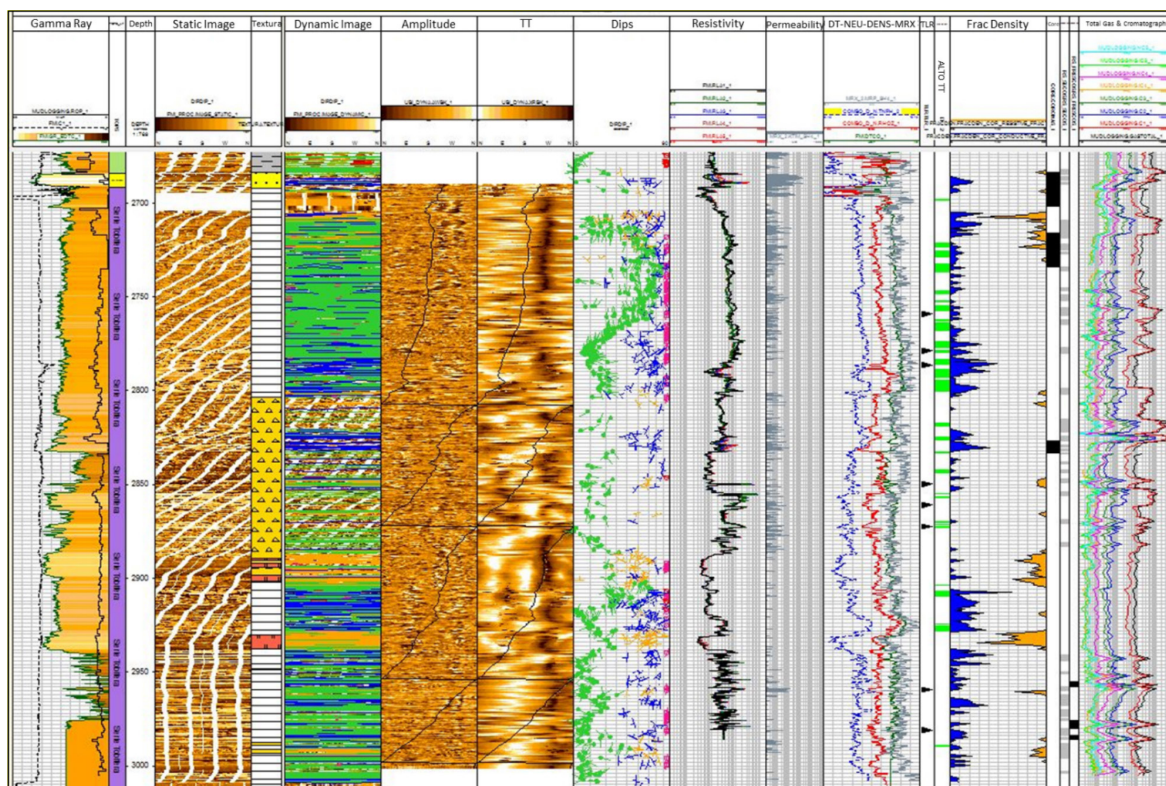


Figura 5. Respuesta de diferentes herramientas de perfilaje, interpretación de imágenes de pozo y datos de control geológico. Tomado de Simonetto (2018).

A partir de la evaluación de las imágenes de pozo, se interpretaron planos de fractura resistivas y conductivas. En el caso de las conductivas, en algunos sectores se observó una correlación con atenuaciones en los tiempos de tránsito en la imagen acústica. Esta relación, combinada con el incremento en el gas total, se interpretó como la evidencia de apertura en las fracturas. Se observó también que la mayor densidad de fracturas se asocia a texturas estratificadas o con bandeo paralelo.

ESTRATIGRAFÍA MECÁNICA

Las unidades mecánicas se realizaron a partir de las interpretaciones de las fracturas en las imágenes de pozo. Se generó una curva de Acumulada de fracturas (La Pointe 2010) (Fig. 6), definiendo un límite mecánico donde existe un cambio de pendiente de la misma. Este patrón mostró repetitividad entre los pozos. De esta manera la correlación mecánica permite definir límites mecánicos para las fracturas que fueron luego utilizados como horizontes para generar la grilla para el modelado.

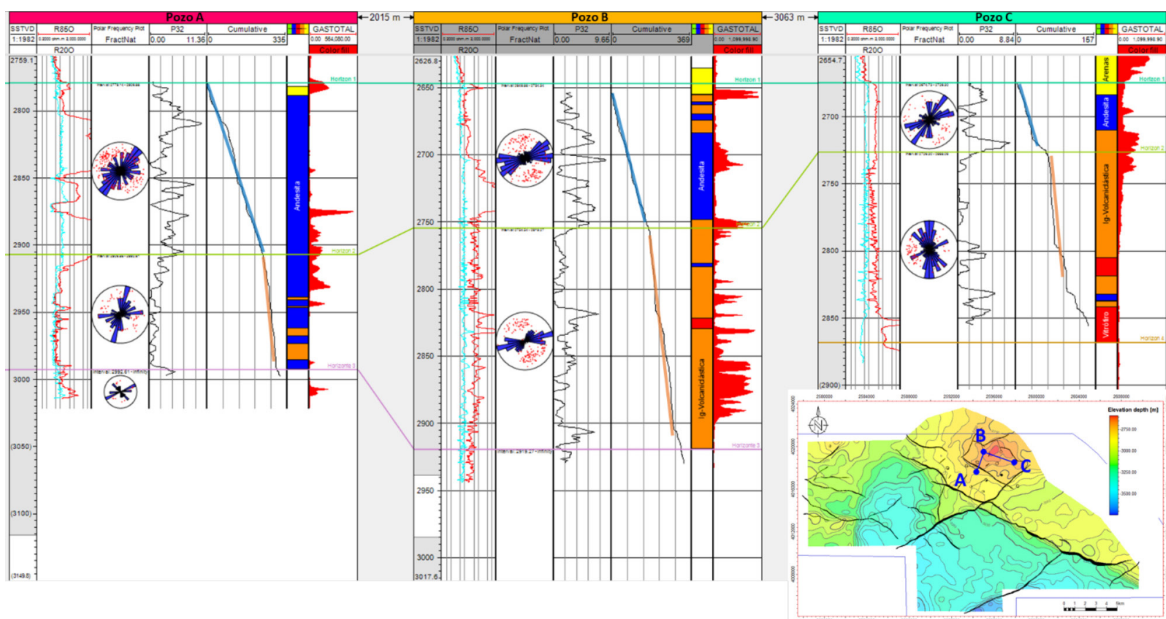


Figura 6. Estratigrafía mecánica definida en base a la acumulada de fracturas interpretadas a partir de las imágenes de pozo acústicas y resistivas.

GRILLA DE INTENSIDAD DE FRACTURAS

A los fines de definir mejores zonas para perforar nuevos pozos, se decidió realizar una grilla de intensidad de fracturas probabilística, a través de la realización de un modelado mecánico.

Con esta finalidad se generaron las superficies definidas de la estratigrafía mecánica, que fueron utilizados como horizontes definiendo grandes paquetes mecánicos. Al mismo tiempo se realizó una identificación de los principales planos de falla (como el que se observa en la figura 7), y posteriormente se interpretaron sus reactivaciones. Paralelamente se llevó a cabo la revisión de trabajos publicados sobre la deformación en el área, mediante la cual se establecieron 5 eventos tectónicos principales con diferente dirección de máximo esfuerzo: la etapa de *rift* de edad Jurásica (Uliana *et al.* 1989) con σ_1 260° – 220° y los eventos de convergencia oblicua de edades Cretácica con σ_1 310° – 270°, Eocena con σ_1 310° – 270° (Ghiglione *et al.* 2016), Oligocena con σ_1 260° – 220° (Muller *et al.* 2016) y actual con σ_1 285° – 245° (Ghiglione op.cit).

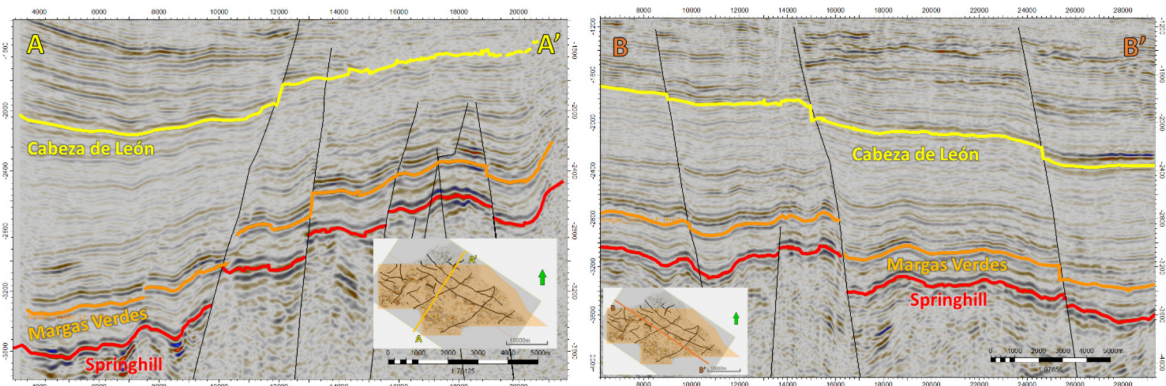


Figura 7. Secciones sísmicas donde se observan ejemplos de las fallas principales reactivadas.

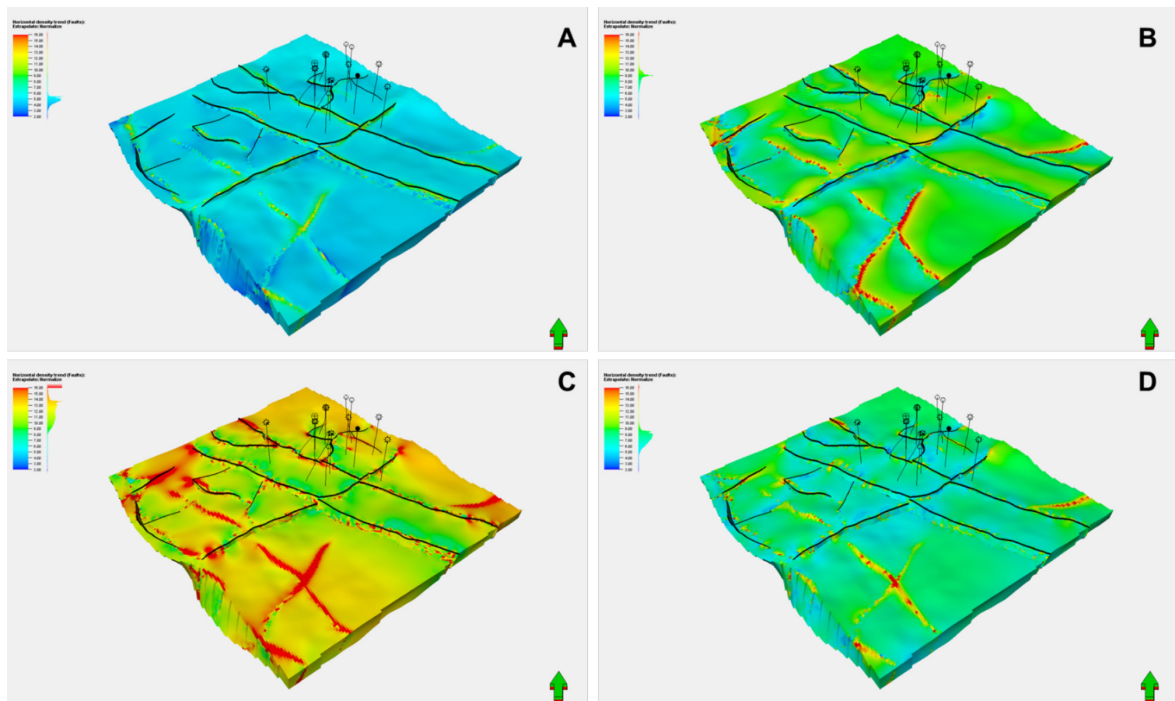


Figura 8. En las diferentes grillas de intensidad de fracturas se muestra la evolución de la deformación en cada evento. A- Jurásico, B- Cretácico, C- Oligoceno, D- Actual.

Integrando las observaciones en las imágenes, coronas y sísmica se construyó un modelo de fracturas naturales asociadas a la deformación en base a lo sugerido por Phillips *et al.* (2014) y Maerten *et al.* (2016). Fue así que se generaron modelos numéricos de la deformación asociada a cada uno de los principales eventos tectónicos ocurridos en el área (Fig. 8).

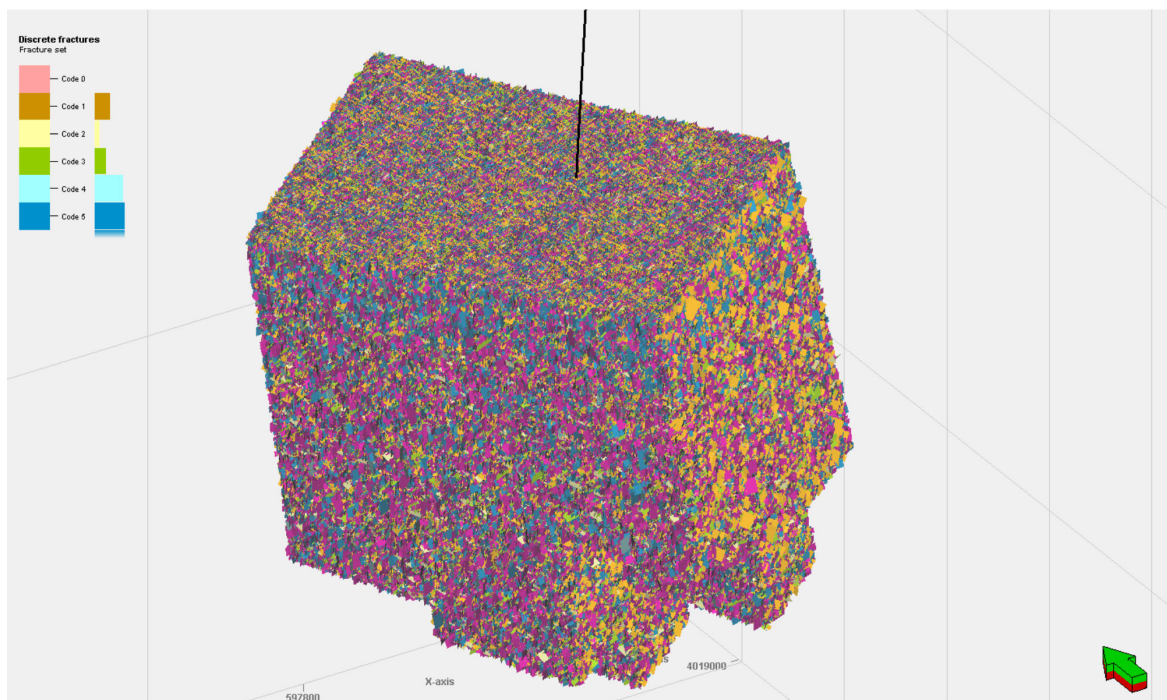


Figura 9. DFN a escala de pozo. Cada color de la referencia representa a cada una de las familias de fracturas modeladas.

Luego, se utilizaron las interpretaciones de las imágenes de pozos para validar y calibrar las orientaciones e intensidades arrojadas por los modelos como está indicado por López *et al.* (2016) y Hryb *et al.* (2018).

Finalmente, con las grillas de intensidad y orientación de fracturas naturales se pobló el modelo de DFN (*Discrete fracture Network*) (Fig. 9) que fue incluido en el modelado de Fractura Hidráulica. Al momento de realizar una simulación dinámica, deberá sumarse la grilla de porosidad de la matriz como aportante al almacenaje de hidrocarburos en el área.

INTERPRETACIÓN Y CONCLUSIONES

La Serie Tobífera comprende un conjunto de rocas volcánicas con espesos conjuntos ignimbríticos, facies lávicas y niveles piroclásticos. Se pueden encontrar distribuidos en extensos *plateau* o constituyendo rellenos de hemigrábenes de más de 2000 m de espesor. Los intervalos con buenas propiedades reservorio suelen estar vinculados con procesos secundarios como la

fracturación tectónica o de origen primario a partir de procesos volcánicos de emplazamiento y enfriamiento posterior al emplazamiento (Hinterwimmer 2002).

En el ámbito de Tierra del Fuego, han sido descriptas diversas asociaciones de facies, relacionadas con procesos explosivos, efusivos y alteración hidrotermal posterior. Las facies identificadas integradas con la sismica mostraron la gran variabilidad lateral de este tipo de ambientes geológicos y su gran complejidad. Los datos fueron integrados en el modelo de graben caldera, que presenta una combinación de procesos tectónicos y volcánicos (Navarrete y Márquez 2017). De esta manera se interpreta la alta probabilidad de materiales piroclásticos en aquellos lugares donde la Serie Tobífera presenta mayor espesor, y en aquellos lugares donde se encuentran las fallas principales que actúan de conductos, aumenta la probabilidad de presencia de lavas y alteraciones hidrotermales (Mykietiuik *et al.* 2019).

El presente trabajo intenta caracterizar de forma preliminar la Serie Tobífera en el bloque Lago Fuego. Los estudios realizados involucran escalas de trabajo muy diferentes, desde la caracterización microscópica, hasta la evaluación estructural del área.

La existencia de muestras de roca como coronas y testigos laterales rotados resultaron elementos clave para la caracterización del ambiente y de las unidades existentes. Estas muestras, sumadas a los perfiles de pozo y los datos aportados por el control geológico, permiten realizar una caracterización completa de las unidades presentes, delimitando las zonas con potencial hidrocarburífero.

Pudieron reconocerse unidades con diferente génesis, que presentan diferentes características litológicas, como composición, textura y porosidad. Las facies identificadas se dividen en dos grandes grupos: rocas volcánicas cohesivas, cuya facies predominante es lava fenodácica a fenoandesítica y rocas volcanoclásticas, como *block and ash* (de composición fenoandesítica) y tobas de caída (vitrófiro). Tanto las facies explosivas como las efusivas presentan un alto grado de alteración hidrotermal. Se reconoció la importancia de la presencia de fracturas naturales, dada la baja capacidad de flujo que presentan todas las unidades descriptas. Pudieron reconocerse fracturas de origen tectónico y térmico.

Se construyó un modelo de deformación basado en la interpretación del cubo sísmico, la interpretación del sistema de fracturas observado en las imágenes de pozo y la descripción de fracturas naturales realizada sobre los testigos corona. La combinación de estos resultados sumados a la identificación de los eventos tectónicos conocidos en este ámbito, permitieron elaborar un modelo prospectivo predictivo de facies mecánicas y grillas de intensidad de fracturas. Considerando el impacto que tienen las fracturas naturales en la calidad de reservorio de la Serie Tobífera, estas herramientas posibilitan reducir la incertidumbre en nuevos prospectos.

Actualmente se sigue trabajando en la comprensión del modelo geológico, en donde la aplicación de nuevas técnicas y la adquisición de datos juega un rol fundamental.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a YPF S.A. por permitir la publicación de este trabajo. También queremos agradecer a nuestros colegas, revisores técnicos y a los profesionales de los diferentes laboratorios y consultoras por el aporte de sus conocimientos que contribuyeron para enriquecer las discusiones técnicas ayudando a comprender el modelo geológico del área.

REFERENCIAS CITADAS

- Atencio, M., Späth, F. y Azpiroz, G., 2018. Caracterización sísmica de reservorios complejos: Serie Tobífera. X Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos. IAPG. Simposio de Geofísica: La Geofísica como vínculo entre el conocimiento de la tierra y la sociedad. p. 291-300.
- Azpiroz, G., Covellone, G., Mykietiuik, K., Simonetto, L., Atencio, M., Tórtora, L., Ancheta, D., Meisinger, V. y Pedro, E., 2018. Exploración del Play Serie Tobífera en el ámbito de Tierra del Fuego. Cuenca Austral. Argentina y Chile. X Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos. IAPG.
- Cortiñas, J. y Hlebszevitsch, J., 2005. Informe Regional Cuenca Austral Aspectos Generales, Estratigrafía y Bosquejo Paleogeográfico de sus Ciclos Sedimentarios. Repsol YPF Informe Inédito.
- Ghiglione, M., Ramos, V., Cuitiño, J. y Barberón, V., 2016. Growth of the Southern Patagonian Andes (46–53°S) and Their Relation to Subduction Processes. En Folguera, A., Naipauer, M., Sagripanty, L., Ghiglione, M., Orts, D., Giambiagi, L. (eds.). Growth of the Southern Andes, Springer Earth System Sciences, p. 201-240. DOI 10.1007/978-3-319-23060-3_10
- Gust, D.A., Biddle, K.T., Phelps, D.W. y Uliana, M.A., 1985. Associated Middle to Late Jurassic volcanism and extension in southern South America. *Tectonophysics*, v.16, p. 223-253.
- Hinterwimmer, G., 2002. Los reservorios de la Serie Tobífera. En Schiuma, M., Hinterwimmer, G., Vergani, G. (eds.), Rocas Reservorio de las Cuenas Productivas Argentinas, p.27-47.
- Hryb, D.E., Lopez, R.G. y Manceda, R., 2018. Tectonic History Validation in a Multi-Phase Deformation Basin Using Natural Fracture System, Vaca Muerta Fm., Argentina. 2nd International Discrete Fracture Network Engineering Conference held in Seattle, Washington, USA, 20–22 June 2018. American Rock Mechanics Association. DFNE 18-855.
- La Pointe P., 2010. Techniques for Identification and Prediction of Mechanical Stratigraphy in Fractured Rock Masses, 44th US Rock Mechanics Symposium and 5th U.S.-Canada Rock Mechanics Symposium, held in Salt Lake City, UT June 27–30, 2010. ARMA 10-296.
- LCV s.r.l., 2018a. Reporte #4108/18: Sondeo PLF. TF.LF-2013 (Lago Fuego). Testigos laterales. Formación Nueva Argentina y Serie Tobífera. Estudio litológico, petrográfico, diagenético, mineralógico, geoquímico y petrofísico. Informe interno YPF S.A.
- LCV s.r.l., 2018b. Reporte #4117/18: Sondeo PLF. TF.LF-2013 (Lago Fuego). 1ª a 4ª ccc. Formación Springhill y Serie Tobífera. Estudio sedimentológico, petrográfico, diagenético y mineralógico. Informe interno YPF S.A.

- Lopez, R., Hryb D. y, Manceda, R., 2016. Genetically Classifying Fractures Using 3D Tectonic Modeling in an Unconventional Play, Argentina. AAPG Annual Convention & Exhibition in Calgary, Alberta, Canada.
- Lopez, R., Ruiz, R., Spacapan, J., Hryb D., Manceda, R., Santiago E. y Montagna, A., 2018. Por qué y cómo hacer un modelo conceptual de fracturas naturales, el ejemplo de la Fm. Cupén Mahuida. X Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Mendoza, Argentina. p. 971-985.
- Maerten, L., Maerten, F., Lejri, M., y Gillespie, P. 2016: Geomechanical paleostress inversion using fracture data, J. Struct. Geol., 89, p. 197-213.
- Müller, R.D., Seton, M., Zahirovic, S., Williams, S.E., Matthews, K.J., Wright, N.M., Shephard, G.E., Maloney, K.T., Barnett-Moore, N., Hosseinpour, M., Bower, D.J. y Cannon, J., 2016. Ocean basin evolution and global-scale plate reorganization events since Pangea breakup, Annual Review of Earth and Planetary Sciences, Vol 44, p. 107-138. DOI: 10.1146/annurev-earth-060115-012211.
- Mykietiuk, K., Azpiroz, G., Simonetto, L., Covellone, G. y Petrinovic, I., 2019. Geological Model of Serie Tobífera for oil and gas exploration, Austral Basin, Tierra del Fuego, Argentina. LASI VI: Malargüe, Argentina, p. 25-29.
- Navarrete, C. y Márquez, M., 2017. Caldera del Deseado: una Graben Caldera multiepisódica Jurásica del sector nor – oriental del Macizo del Deseado. XX Congreso Geológico Argentino, p. 116-123.
- Nelson, R., 2001. Geologic Analysis of Naturally Fractured Reservoirs. Elsevier, 352 p.
- Phillips, H., Joonnekindt, J.P. y Maerten, L., 2014. Natural Fracture Prediction for Discrete Fracture Modelling. 76th Conference & Exhibition 2014. Amsterdam.
- Simonetto, L., 2018. Interpretación de imágenes de pozo Serie Tobífera, Tierra del Fuego, Cuenca Austral, Argentina. Informe Interno YPF. S.A.
- Structural Diagenesis Initiative, 2018., Software, Methods and Papers by Topic. University of Texas at Austin, Public website <http://www.jsge.utexas.edu/sdi/software-and-methods>
- Uliana, M.A., Biddle, K.T. y Cerdán, J., 1989. Mesozoic extension and the formation of Argentine basins, in A. J. Tankard and H. R. Balkwill, eds. Extensional tectonics and stratigraphy of the north Atlantic margins: AAPG Memoir 46, p. 599-614.

