

Geología y desarrollo de la Formación Vaca Muerta en el yacimiento Loma Campana, Cuenca Neuquina

Franco VITTORE¹, Diego LICITRA¹, Juan QUIROGA¹ y Carlos HERNANDEZ²

¹YPF SA. Email: franco.vittore@ypf.com, diego.licitra@ypf.com, juan.r.quiroga@ypf.com

²Chevron. Email: hrnc@chevron.com

RESUMEN

Se expone en la presente contribución un resumen de las principales características geológicas de la Formación Vaca Muerta en el yacimiento Loma Campana, considerando aspectos estructurales, sismoestratigráficos, petrofísicos y sedimentológicos. Asimismo, se presenta una reseña histórica sobre el primer desarrollo masivo de un reservorio tipo *Shale* en Argentina. La metodología empleada consistió en la interpretación de la información geológica recabada en los primeros 3 años del proyecto, incluyendo sísmica 3D, control geológico, testigos corona, perfiles de pozo y afloramientos. De la integración de los datos analizados surge que: 1) La estructura local se define como un homoclinal de suave buzamiento, con un sector oriental caracterizado por un bajo grado de deformación y escasa ocurrencia de fallas regionales, y un sector centro-occidental representado por un conjunto de fallas en *échelon*, con rumbo NO y buzamientos al NE y SO. 2) La interpretación sismoestratigráfica permitió identificar dos ciclos agradacionales que presentan un alto potencial hidrocarburífero, en los cuales se focalizó el desarrollo tipo "factoría" de pozos horizontales del proyecto, y seis niveles progradacionales de orientación NO-SE, con potencial petrolero adicional. Dentro de este *framework* se interpretaron 20 ciclos regresivos-transgresivos de menor orden. 3) La interpretación petrofísica arroja valores promedio para la Formación Vaca Muerta de 9% de porosidad total, 3% de carbono orgánico total (COT) y saturaciones de agua variables desde la zona Este a la zona Oeste del bloque (25-55%).

Palabras clave: *Geología, Interpretación, Vaca Muerta, Shale, Loma Campana.*

ABSTRACT

Geology and development of Vaca Muerta Formation in Loma Campana Field, Neuquén Basin, Argentina.

A summary of the main geological characteristics of the Vaca Muerta Formation in Loma Campana field is presented in this article, considering structural, stratigraphic, petrophysical and sedimentological aspects, along with a historical review of the first massive development of a Shale reservoir in Argentina. The methodology consists of the geological information interpretation, including 3D seismic, mud logging, cores, well logs and outcrops, gathered in the first 3 years of the project. Based upon the integration and interpretation of the analyzed data we conclude that: 1) The local structure is defined as a gently dipping homocline, with an eastern sector characterized by low deformation and scarce occurrence of regional faults, and a central western sector represented by a set of NW faults in echelon, with NE and SW dips. 2) The seismic-stratigraphic interpretation allowed us to identify two aggradational cycles with high hydrocarbon potential, in which the horizontal wells of the project were located, and six NW-SE progradational levels, with additional hydrocarbon potential. 3) The petrophysical interpretation for the Vaca Muerta Formation shows average values of 9% total porosity, 3% total organic carbon and varying water saturations from East to West (25-55%).

Keywords: *Geology, Interpretation, Vaca Muerta, Shale, Loma Campana.*

INTRODUCCIÓN

En este trabajo nos proponemos analizar las principales características geológicas que forman parte de la evaluación y desarrollo del *play* no convencional de la Formación Vaca Muerta en el Yacimiento Loma Campana. A su vez describiremos los principales hitos del primer proyecto de *Shale Oil* fuera de América del Norte.

El yacimiento Loma Campana se localiza 90 km al NO de la ciudad de Neuquén y a 5 Km de la localidad de Añelo (Fig. 1a), se enmarca en el sector norte del área de reserva histórica de Loma La Lata-Sierra Barrosa, posee una superficie de 395 km² y limita al sur por el río Neuquén. Representa el primer desarrollo masivo de un reservorio tipo *Shale*, a gran escala fuera de EEUU, cuyos descubrimientos de *Shale Oil* y *Shale Gas* tuvieron lugar en 2010, en los pozos LLL-479 y LLLK.x-1, respectivamente. En la actualidad, el proyecto cuenta con más de 480 pozos en producción efectiva de la Formación Vaca Muerta. Se enmarca en la región morfoestructural del Engolfamiento Neuquino, el cual limita al Oeste por la faja plegada y corrida, al Este y Noreste por la plataforma nororiental y al sur por la Dorsal de Huincul. Ésta última es un rasgo estructural de escala regional que se extiende por 250 km, formada por un tren de estructuras con dirección preferencial E-O, con vergencia hacia el sur. En términos regionales el área se encuentra en una zona donde predominan

las estructuras transcurrentes dextrógiras de dirección NO (Fig. 1b). Se reconoce un sector occidental con estructuras compresivas y un sector oriental donde predominan las estructuras transcurrentes dextrógiras (Silvestro y Zubiri 2008). En la figura 1c se presenta la columna estratigráfica para la zona del engolfamiento, donde se destacan las formaciones productivas del área, correspondientes al sistema Vaca Muerta-Quintuco, las cuales están genéticamente relacionadas en su origen depositacional. El modelo estratigráfico regional propuesto es el de una rampa mixta carbonática-silicoclástica de orientación SE-NO (Mitchum y Uliana 1982), donde las facies de margas y fangolitas ricas en materia orgánica constituyen los depósitos pendiente abajo de la Formación Vaca Muerta, interpretadas como ambientes distales y de centro de cuenca, mientras que las facies carbonáticas de la Formación Quintuco representan los niveles proximales de plataforma externa.

METODOLOGÍAS

La caracterización geológica de la Formación Vaca Muerta en el área se llevó a cabo sobre la base de una extensa campaña de adquisición de datos efectuada entre los años 2010 y 2013, la cual incluyó el procesamiento de 395 km² de sísmica 3D, cinco testigos corona, 145 pozos con control geológico, 224 sondeos

con perfiles *open hole*, 23 operaciones de microsísmica, a la cual se incorporaron los rasgos más conspicuos de dicha formación, observados en distintos afloramientos de la Cuenca Neuquina. Entre los estudios desarrollados sobre los datos de las operaciones mencionadas se encuentran: interpretación sísmica y mapeo de rasgos estructurales en software de modelado geológico 3D, petrofísica básica en laboratorio y en software de modelado de curvas, análisis mineralógico aplicando difracción de rayos x (DRX), características de materia orgánica (COT) con método Rock-Eval, estimación de carbono orgánico total con método LECO. Petrográficamente se toma la clasificación de Folk (1974) para las rocas silicoclásticas, y de Dunham (1962) para las rocas carbonáticas.

RESULTADOS

Estructura

A escala de yacimiento, la estructura para Loma Campana se interpreta como un homoclinal con suave buzamiento hacia el NNE. Se reconocen dos zonas estructurales bien diferenciadas dentro del bloque: 1) Zona oriental caracterizada por un bajo grado de deformación y escasa ocurrencia de fallas regionales que alcancen a la Formación Vaca Muerta, y 2) zona centro-occidental con mayor grado de estructuración, evidenciado por una familia de

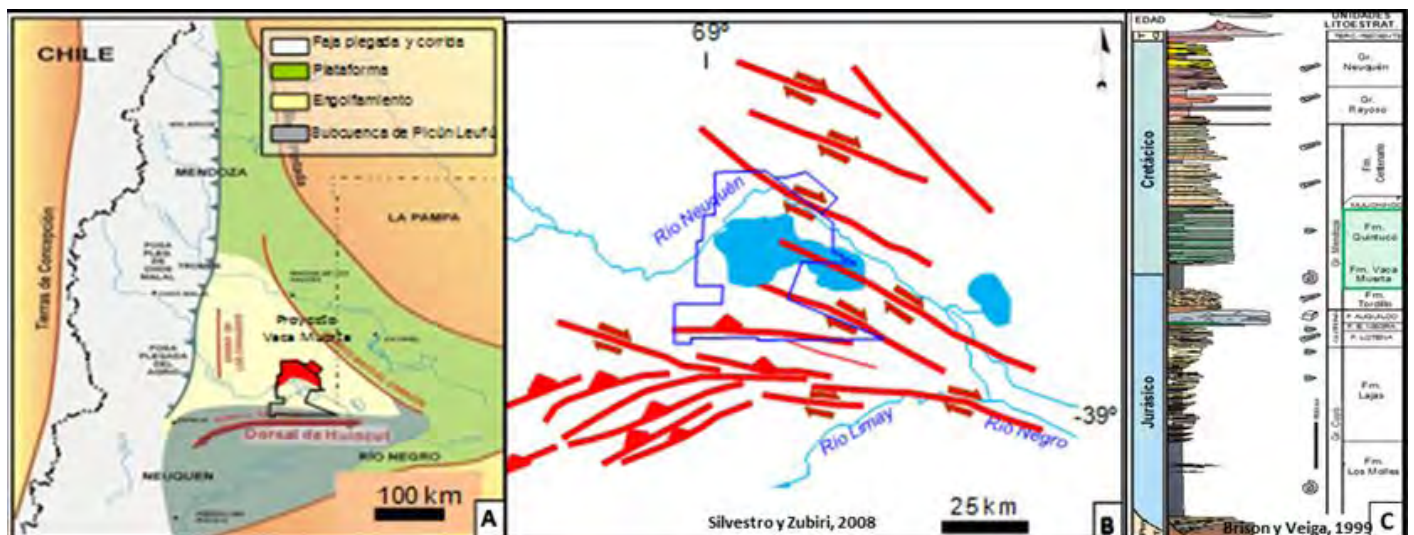


Figura 1. a) Ubicación y marco morfoestructural del yacimiento Loma Campana; b) Principales estructuras regionales para la zona de la Dorsal de Huincul; c) Columna estratigráfica para la región del Engolfamiento Neuquino.

fallas en *échelon*, con rumbo NO y buzamientos al NE y SO, las cuales se vinculan genéticamente con reactivaciones de estructuras extensionales preexistentes del basamento (Cristallini *et al.* 2009). En el sector occidental del área se reconoce un espolón que buza hacia el N, el cual es atravesado por una serie de fallas inversas de rumbo NNE. Otro elemento estructural de utilidad en el desarrollo del campo lo constituye la interpretación del esfuerzo máximo horizontal (dirección de crecimiento preferencial de las fracturas hidráulicas), el cual se encuentra entre un rango de 90° y 110°, calculado en base a *breakouts* observados en los perfiles de imágenes de pozos, y confirmado posteriormente por información microsísmica.

Sismoestratigrafía

A fin de enmarcar la interpretación sismoestratigráfica realizada y uniformizar criterios generales se referenciará los niveles aquí descriptos con los análogos expuestos oportunamente en la Piedra Rosetta de la Formación Vaca Muerta (Desjardins *et al.* 2016). Mediante interpretación y mapeo de las superficies sísmicas de mayor interés se definió el esquema estratigráfico conceptual del campo (Fig. 2), donde se destacan, suprayaciendo a las areniscas eólicas de la Formación Catriel, dos ciclos agradacionales de alto potencial petrolero en Loma Campana, el primero corresponde al sistema transgresivo basal, conocido informalmente como

Nivel Cocina (intervalos T1-T3, Transecta Regional de la Formación Vaca Muerta), conformado por litofacies de fangolitas con alto contenido de COT (6-8%), de espesores variables entre 30 y 40 metros y porosidad total promedio de 12% (Vittore *et al.* 2016). El segundo ciclo agradacional inicia con un nuevo evento transgresivo de fangolitas calcáreas, de 23 m de espesor promedio, porosidad total promedio de 10%, denominado Nivel Orgánico (intervalos T3-T4, Transecta Regional de la Formación Vaca Muerta), el cual concentra la mayoría de los pozos horizontales perforados a la fecha en Loma Campana. Luego, el sistema se torna netamente progradante hacia el NO, representado por 6 progradaciones (Intervalos T3-B1, Transecta VM) con orientación SE-NO, dentro de las cuales y mediante correlación de detalle en pozos, se identificaron 20 ciclos regresivos-transgresivos, enmarcados dentro del intervalo comprendido entre los techos de las Formaciones Vaca Muerta y Catriel. A escala de yacimiento, como se puede observar en el esquema conceptual, los niveles de navegación de los pozos horizontales del proyecto se localizan en los *foresets* y *bottomsets* de las clinoformas. La zona de *topsets* de sistema no tiene interés desde el punto de vista hidrocarburífero no convencional, pues contiene baja riqueza orgánica (COT < 1%), por lo que se ha evitado estimular estos intervalos tanto en pozos verticales como horizontales.

Petrofísica

Los parámetros petrofísicos se calcularon en 58 pozos verticales distribuidos a lo largo del campo que contaban con un set completo de perfiles abiertos, los cuales fueron ajustados con datos de corona y estudios de difracción de rayos x. Considerando un *cutoff* mayor a 1% de COT para el techo de la Formación Vaca Muerta, surgen espesores variables de la misma entre 80 m en la zona Este y 320 m en la zona Oeste del campo. Para el cálculo de contenido orgánico total se utilizó el cálculo de Schmoker modificado (Schmoker 1979), utilizando el registro de densidad y calibrado con datos de laboratorio, arrojando un promedio de 3% para la Formación Vaca Muerta en el área. La porosidad total del modelo se calculó a partir de una ecuación que contempla el registro de neutrones y ajusta con la porosidad del registro de resonancia magnética (Fig. 3, Cuervo *et al.* 2016), obteniendo porcentajes variables entre 4 y 15%, y promedio de 9%.

Para el cálculo del volumen de agua se considera el volumen derivado de la herramienta de dispersión dieléctrica (ADT). Para el cálculo de la porosidad rellena con agua se utiliza la resistividad profunda combinada con el parámetro MN de Archie que, si bien es variable para Vaca Muerta a lo largo de la cuenca, a los efectos del flujo de trabajo se toma un valor constante. Con estas asunciones, se obtiene una ecuación que tiene un buen ajuste con

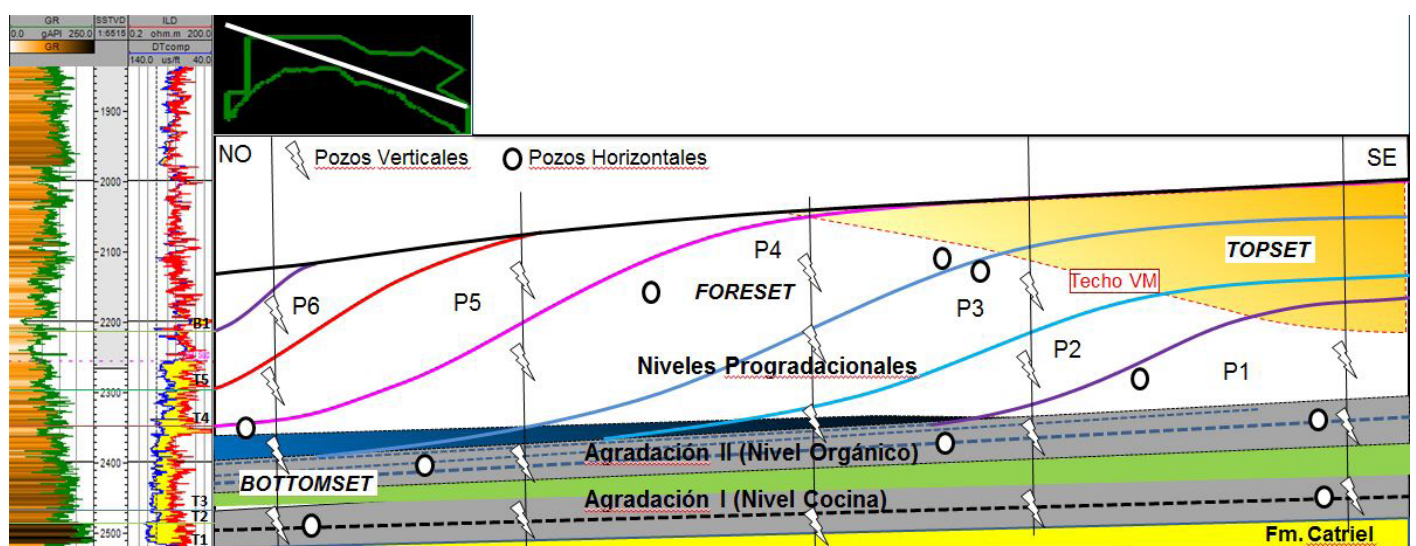


Figura 2. Esquema estratigráfico conceptual de Loma Campana y perfil eléctrico tipo.

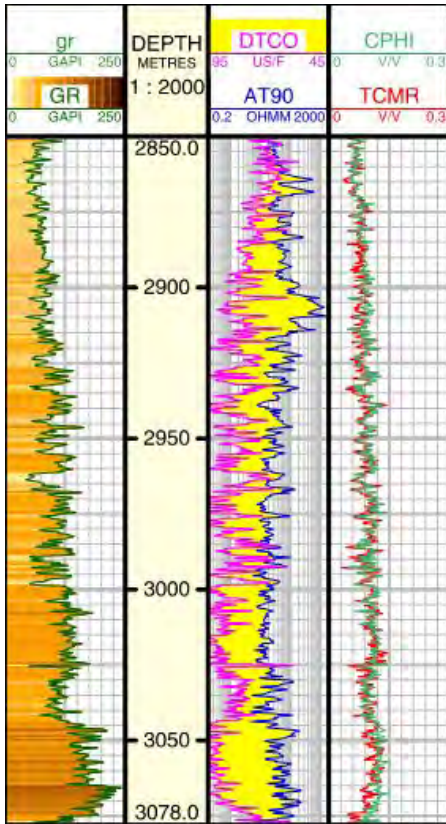


Figura 3. Ejemplo comparando porosidad total del modelo (CPHI) contra la porosidad total de la resonancia magnética (TCMR)

valores de salida de saturación de agua variable de 25% en la zona Este y 55% en la zona Oeste del bloque.

Por otra parte, los resultados de difracción de rayos X (DRX), a partir de muestras de *cutting* de varios pozos que barren el área E-O, muestran que la Formación Vaca Muerta se compone en valores promedio, de un 33% de material silicoclástico (cuarzo y plagioclasas), 46% de carbonatos (calcita y dolomita), 3% de pirita y 18% de arcillas. También se realizaron DRX sobre la fracción arcilla, donde se destaca que entre la illita y el interestratificado illita/esmectita se tiene un 82% del total, con 15% de clorita y 3% de caolinita.

Sedimentología

Dentro de los rasgos y elementos más relevantes observados en distintos afloramientos de la Formación Vaca Muerta podemos mencionar: 1) Litofacies: Se reconocen dos litofacies bien distintivas: a) Margas oscuras, con laminación penetrativa, presencia de amonites y fisuras tortuosas; b) Calizas de coloración clara, duras,

masivas y con fisuras planares (Fig. 4a); 2) Nódulos carbonáticos: se interpretan como producto de una diagénesis temprana de la interfase agua/sedimento, evidenciada por la ausencia de compactación en el interior los mismos. Son duros y masivos, pudiendo tener de pocos centímetros a 1 metro de longitud y 50 cm de altura. Muestran mayor ocurrencia hacia la base de la Formación Vaca Muerta (Fig. 4b); 3) Niveles carbonáticos (*beef*): Ampliamente distribuidos en distintos afloramientos de la Formación Vaca Muerta, principalmente hacia la base de la misma. En la bibliografía se los define bajo el término *beef* (Rodríguez *et al.* 2009, Fig. 4c-d) y son indicadores de sobrepresión de la roca madre. Presentan espesores variables entre 1 y 10 cm, integrados por dos familias de cristales: la interna, desarrollada perpendicularmente a la roca de caja, y la externa, con ángulo respecto a la roca de caja; 4) Niveles tobáceos: en campo se reconocen estratos finos de entre 1 y 5 cm de espesor promedio, se describen como arena fina, con clastos subredondeados, de buena selección, compuestos por plagioclasas. Al microscopio se reconocen dos modas, arena fina y limo.

Proyecto no convencional Loma Campana

Los esfuerzos de YPF por evaluar el po-

tencial hidrocarburífero de sus recursos no convencionales en Argentina, comenzaron con una primera etapa exploratoria de la Formación Vaca Muerta, arrojando como resultado los descubrimientos de *Shale Oil* y *Shale Gas* en los pozos LLL-479 y LLLK.x-1, respectivamente, en el ámbito de Loma La Lata Norte en 2010, continuando con una fase de delineación de las principales estructuras geológicas identificadas y el plan piloto de desarrollo inicial del campo. Con el objetivo de reducir costos y tiempos en las operaciones e incrementar la producción del área, la estrategia de gerenciamiento fue mutando hacia un desarrollo modo factoría, reflejado en un aumento de actividad de perforación y terminación, pasando de realizar esquemas de un pozo por locación con su consecuente terminación individual, a esquemas de 4 a 8 sondeos dirigidos desde la misma locación (multipad) con terminaciones en simultáneo.

En 2013 se acelera significativamente el ritmo de desarrollo alcanzando los 22 equipos de perforación y se conforma la UTE entre YPF y Chevron para el desarrollo conjunto del bloque. Inicialmente, la perforación se concentró en el sector Noroeste del yacimiento, teniendo en cuenta la identificación de un *sweet spot*, caracterizado por una mejora en las condiciones petrofísicas en la sección superior de



Figura 4. a) Principales litofacies de Formación Vaca Muerta identificadas en afloramiento; b) Nódulos carbonáticos en la base de Formación Vaca Muerta; c) Bancos de calcita fibrosa (*beefs*); d) Muestra de mano donde se observa el arreglo y disposición de cristales de calcita fibrosa.

Vaca Muerta y la mayor ocurrencia de fracturas naturales, confirmado por altas productividades en los perfiles de producción ejecutados. El mayor inconveniente para la etapa de perforación lo representaba la Formación Quintuco, ubicada de manera suprayacente a la Formación Vaca Muerta, la cual produce mediante fracturas naturales presentes en las facies carbonáticas de ambiente de plataforma externa, con alto grado de sobrepresión. Esta particularidad hacía incrementar los costos de perforación de manera excesiva y en algunos casos conducía a la pérdida del sondeo. La aplicación de las tecnologías de perforación bajo balance (UBD, *under balance drilling*) y *casing drilling* hicieron posible el desarrollo de este sector del campo. Durante el 2015 finaliza el desarrollo del sector NO con pozos verticales y la estrategia de negocio migra a la perforación de pozos horizontales concentrados en el sector Este, buscando drenar los niveles estratigráficos evaluados con mayor potencial, conocidos informalmente como niveles Orgánico y Cocina. Actualmente el proyecto cuenta con más de 480 pozos (78% verticales/dirigidos y 22% horizontales) en producción efectiva de la roca generadora.

CONCLUSIONES

La estructura local se interpreta como un homoclinal de suave buzamiento, con un sector oriental caracterizado por un bajo grado de deformación y escasa ocurrencia de fallas regionales, y un sector centro-occidental representado por un conjunto de fallas en *échelon*, con rumbo NO y buzamientos al NE y SO. La interpretación sísmoestratigráfica permitió identificar 2 ciclos agradacionales que presentan un alto potencial hidrocarbúfero, en los cuales se focalizó el desarrollo factoría de pozos horizontales del proyecto. El primero corresponde al sistema transgresivo basal, conocido informalmente como La Cocina, conformado por litofacies de fangolitas con alto contenido de COT (6-8%), de espesores variables entre 30 y 40 metros, y porosidad total promedio de 12%. El segundo ciclo agradacional inicia con un nuevo evento transgresivo de fangolitas calcáreas, de 23 m de espesor promedio, porosidad total promedio de 10%, denomi-

nado Nivel Orgánico. Luego, el sistema se torna netamente progradante, representado por 6 progradaciones, con orientación SE-NO. La interpretación petrofísica arroja valores promedio para la Formación Vaca Muerta de 9% de porosidad total, 3% de COT y saturaciones de agua variables de 25% en la zona Este a 55% en la zona Oeste del bloque.

La estrategia de desarrollo del campo inició con la perforación de pozos verticales/dirigidos en la zona Oeste del bloque, aprovechando espesores de 300 m de la roca madre, migrando a un desarrollo de pozos horizontales en el sector Este, focalizado en los niveles que presentan las mejores características geológicas. El modo de desarrollo "factoría", la aplicación de nueva tecnología referida a perforación y terminación, y los pilotos de optimización de producción y operaciones permitieron acelerar considerablemente la curva de aprendizaje y bajar significativamente los costos del proyecto. El análisis geológico en el bloque Loma Campana y su contexto regional permite reconocer y dimensionar variables críticas para la evaluación y desarrollo de un *play* no convencional de hidrocarburos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a las autoridades de las compañías YPF SA y Chevron por permitir la publicación de este trabajo para la comunidad científica. A los colegas Manuel Fantin, Denis Marchal y Hector Leanza por sus comentarios y sugerencias que permitieron enriquecer este manuscrito.

REFERENCIAS

Cristallini, E.R., Tomezzoli, G., Pando, C., Gazzera, J., Martínez, J., Quiroga, J., Bühler, M., Bechis, F., Barredo, S. y Zambrano, O. 2009. Controles Precuyanos en la estructura de la Cuenca Neuquina. Revista de la Asociación Geológica Argentina 65: 48-64.

Cuervo, S., Lombardo, E., Vallejo, D., Crousse, L., Hernandez, C., Mosse, L. 2016. Towards a simplified petrophysical model for the Vaca Muerta Formation. URTEC, San Antonio.

Desjardins, P., Fantin, M., González Tomassini, F., Reijenstein, H., Sattler, F., Domínguez, R., Kietzmann, D., Leanza, H.A., Bande, A., Be-

noit, S., Borgnia, M., Vittore, F., Gil, G., Simo T. y Minisini, D. 2016. Capítulo 2: Estratigrafía Sísmica Regional. En: En: González, G., Vallejo, M.D., Kietzmann, D.A., Marchal, D., Desjardins, p., Gonzalez Tomassini, F., Gómez Rivarola, L. y Domínguez, R.F. (eds.), Transecta Regional de la Formación Vaca Muerta. Integración de sísmica, registro de pozos, coronas y afloramientos. Instituto Argentino del Petróleo y el Gas – Asociación Geológica Argentina: 5-22, Buenos Aires.

Dunham, R.J. 1962. Classification of carbonate rocks according to depositional texture. En: Hamm, W.E. (ed), Classification of Carbonate Rocks. American Association of Petroleum Geologists, Memoir 1: 108-121, Tulsa.

Folk, R.L. 1974. Petrology of sedimentary Rocks. Hemphill, 172 p., Austin.

Mitchum, R.M. y Uliana, M.A. 1982. Estratigrafía sísmica de las Formaciones Loma Montosa, Quintuco y Vaca Muerta, Jurásico Superior y Cretácico Inferior de la Cuenca Neuquina, Argentina, 1º Congreso Nacional de Hidrocarburos, Petróleo y Gas, Actas: 439-484, Buenos Aires.

Rodrigues, N., Cobbold, P., Loseth, H. y Ruffet, G. 2009. Widespread bedding-parallel veins of fibrous calcite ("beef") in a mature source rock (Vaca Muerta, Neuquén Basin, Argentina): evidence for overpressure and horizontal compression. Journal of the Geological Society 166: 695-709, London.

Silvestro, J. y Zubiri, M. 2008. Convergencia oblicua: Modelo estructural alternativo para la dorsal neuquina (39°S) - Neuquén. Revista de la Asociación Geológica Argentina 63: 49-64.

Schmoker, J., 1979. Determination of organic content of appalachian devonian shales from formation density-logs. American Association of Petroleum Geologists, Bulletin 63: 1504-1537.

Vittore, F., Quiroga J., Foster, M. y Sagasti, G. 2016. Capítulo 8: Loma Campana. En: González, G., Vallejo, M.D., Kietzmann, D.A., Marchal, D., Desjardins, p., Gonzalez Tomassini, F., Gómez Rivarola, L. y Domínguez, R.F. (eds.), Transecta Regional de la Formación Vaca Muerta. Integración de sísmica, registro de pozos, coronas y afloramientos. Instituto Argentino del Petróleo y el Gas - Asociación Geológica Argentina: 83-93, Buenos Aires.

Recibido: 29 de noviembre, 2017

Aceptado: 15 de mayo, 2018