

ANÁLISIS GEOLÓGICO INTEGRAL DE LOS CONTROLES EN LA ACUMULACIÓN Y PRESERVACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA DE LA FORMACIÓN VACA MUERTA EN EL SECTOR NORTE DE LA CUENCA NEUQUINA

Silvia Barredo¹, Tristán Speranza¹, Agustín Sosa Massaro¹, Ignacio Foschiatti¹, Agustín Párica¹

1: Instituto Tecnológico de Buenos Aires-ITBA, sbarredo@itba.edu.ar, tsperanza@itba.edu.ar, asosa@itba.edu.ar, ifoschiatti@itba.edu.ar, aparica@itba.edu.ar

Keywords: Controles, Materia orgánica, Topografía de cuenca, Formación Vaca Muerta

ABSTRACT

Integrated Geological Analysis of Accumulation Controls and Organic Matter Preservation of Vaca Muerta Formation in the Northern Sector of the Neuquén Basin

Successful exploration depends on a variety of factors being basin modelling decisive. It requires the knowledge of the processes involved in its formation in order to determine whether the necessary conditions for the generation and storage of hydrocarbons have been achieved. Broadly, distribution of the organic matter along geological time in the productive basins coincides with the major events that took place in the Gondwana margin. Thus integrating surface and subsurface tectosedimentary study may help understand the petroleum systems. The Vaca Muerta-Quintuco system (Upper Jurassic to Lower Cretaceous) in the Neuquén Basin (Argentina) has attracted much attention due to its potential as a major unconventional reservoir with shale and tight oil and gas plays. Its geological and petrophysical variations are significantly linked to the geodynamic history of the basin strongly related to the transition from extensional reactivation to thermal relaxation and to its definite pass to flexural dominated subsidence. Major cyclic events related to sea oscillations provided the proper marine environment conditions to promote the development of several organic rich levels. The Vaca Muerta Formation comprises a wide variety of lithologies like shales, *mudstones*, marlstones, carbonates, calcareous sandstones and sandstones. Subsurface data, obtained from mud logging, cores and open well logs are also consistent with it. Clear vertical and lateral heterogeneities in the organic rich facies were reported and proved to be associated with the post-*rift* subsidence interrupted by inverse reactivation and ancient *rift* block uplifting interacting with the eustatic changes, east-west basin asymmetry, climate changes and the initiation of the flexural subsidence in the foreland region. In this paper a comprehensive analysis using outcrop, well, and laboratory data of the Vaca Muerta Formation in the central portion of the basin is presented with the purpose of analyzing the distribution of the organic matter and the possible geological controls the could have underwent within a sequence stratigraphic framework.

INTRODUCCIÓN

La Cuenca Neuquina representa uno de los objetivos hidrocarburíferos más importantes de Argentina ya que cuenta con cinco sistemas petroleros distribuidos en la columna sedimentaria (Urien y Zambrano 1994; Legarreta y Villar 2011). Entre ellos, el sistema Vaca Muerta-Quintuco

se considera el principal objetivo no convencional de la Argentina debido al volumen estimado de recursos y al número de proyectos que se están realizando en la actualidad (Gutiérrez Schmidt *et al.* 2014; Legarreta y Villar 2015; Stinco y Barredo 2016). La evolución tectónica del margen oeste de Gondwana fue lo suficientemente compleja como para requerir de un análisis tectosedimentario integral de superficie y subsuelo para modelar los sistemas petroleros existentes. La alternancia de ciclos extensionales y compresivos en regímenes muchas veces oblicuos, han dado lugar a la conformación de cuencas con geometrías muy variables y marcadas variaciones laterales de espesor (Barredo y Stinco 2013). La Cuenca Neuquina se desarrolló, en un comienzo, como una serie de depocentros angostos, de sección asimétrica, limitados por fallas de diseño en échelon a lo largo de las antiguas zonas de debilidad litosférica (Uliana *et al.* 1989; Urien y Zambrano 1994; Rincón *et al.* 2010; Barredo y Stinco 2013). Actualmente conforma una amplia depresión con morfología de engolfamiento, rellena de sedimentos marinos y continentales que alcanzan los 7000 metros. La evolución de este relleno fue el resultado de la relación entre el espacio de acomodación resultante de la subsidencia tectónica y/o las variaciones eustáticas asociada, la tasa de aporte de sedimentos/agua y las variaciones climáticas de corto plazo (Legarreta y Uliana 1991, 1996; Barredo y Stinco 2013).

El área de estudio se encuentra aflorando en la región de la Yesera del Tromen y Puerta Curaco al oeste, y hacia el este, en el subsuelo, correspondiente al yacimiento El Trapial (Fig. 1A y 1B).

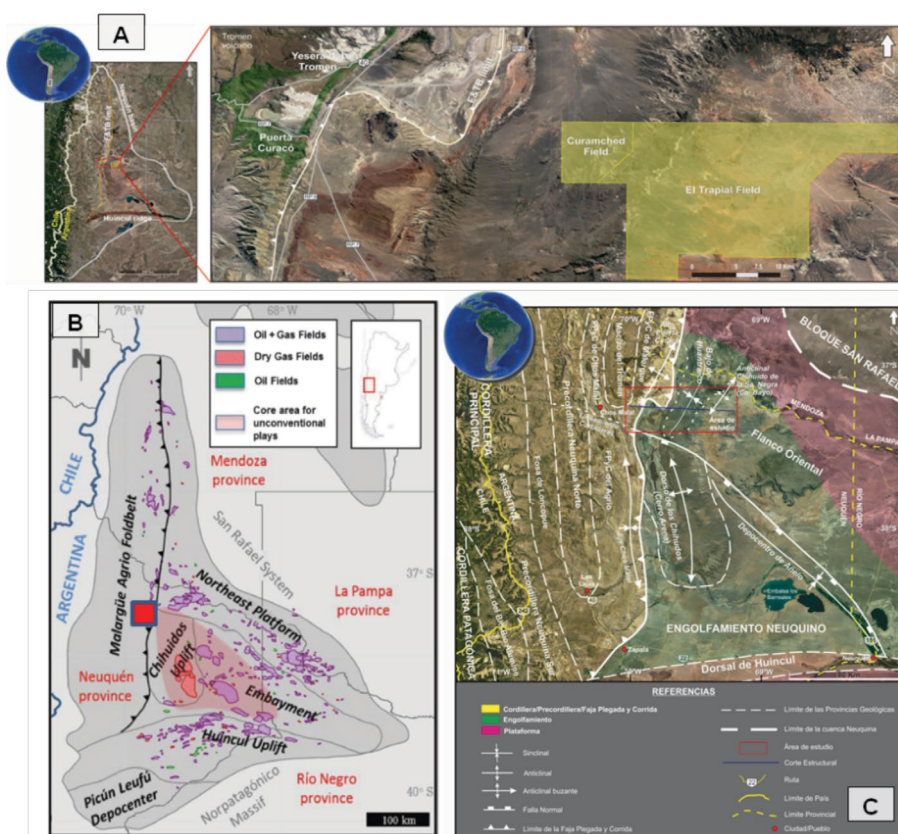


Figura 1. A Mapa de ubicación del área de estudio. B regiones tectónicas de la cuenca, tomado de Sylwan (2014). C Elementos tectónicos del área de estudio.

Coincide con una posición central de cuenca donde se destaca la presencia de tres elementos tectónicos: el depocentro Bajo de Añelo, el alto del Cerro Bayo de la Sierra Negra y el sinclinal de Huantraico de orientación NE-SO (Fig. 1C).

La depositación de la Formación Vaca Muerta ocurrió durante la etapa de enfriamiento térmico del *rift* en el intervalo Tithoniano-Valanginiano (Fig. 2) (Gulisano y Gutiérrez Piembling 1994; Cruz *et al.* 1999). Tuvo lugar sobre un relieve inicialmente suave que fue modificado por actividad tectónica durante gran parte del llenado y controlado por las variaciones eustáticas que determinaron marcadas transgresiones y regresiones sobre una topografía irregular. Se estima que estas características conjuntamente con el clima que controló la productividad orgánica, fueron decisivas en la depositación y preservación de la materia orgánica (MO).

El estudio genético y evolutivo de la Formación Vaca Muerta de este trabajo se realizó mediante el análisis estratigráfico secuencial que se basa en el modelo de Embry y Johannessen (1992), aplicado previamente para esta zona por Kietzmann *et al.* (2014, 2016) y que define la secuencia como compuesta por 2 cortejos sedimentarios, uno regresivo y otro transgresivo, y cuyo límite se ubicaría en el inicio del ciclo transgresivo. Este esquema permite reconocer, en afloramiento y en subsuelo, las superficies de inundación que limitan ciclos de diferentes escalas y que en esta unidad están muy bien desarrollados. Sobre la base de datos sísmicos, perfiles de pozo y testigos-corona,

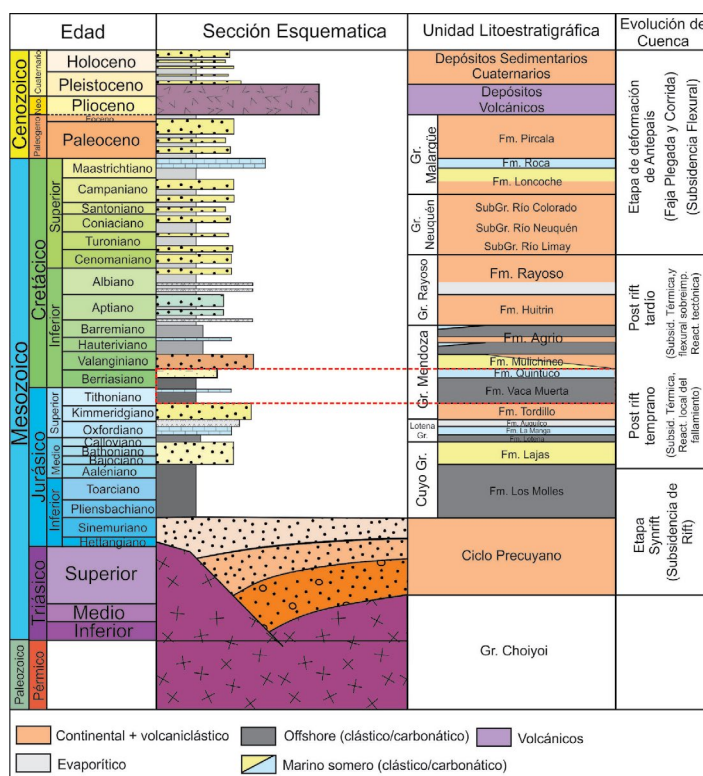


Figura 2. Cuadro estratigráfico del relleno de la Cuenca Neuquina donde se destacan los eventos tectónicos gondwánicos que condicionaron su evolución. Las unidades de estudio están encuadradas por la línea punteada roja.

conjuntamente con los datos de afloramiento se definió para todo el intervalo estudiado, una secuencia transgresivo–regresiva de mayor orden con una máxima expansión marina en la base de la formación y una contracción gradual a partir de ese punto y, 5 secuencias T-R de menor orden (Fig. 3). Este modelo es concordante con los propuestos previamente por Legarreta y Gulisano (1989), Legarretay Uliana (1996), González Tomassini *et al.* (2014) y Kieztmann *et al.* (2016), entre otros. A su vez y, sobre la base de estudios microscópicos y de información geoquímica, se analizó en detalle la mineralogía y composición química de los niveles organógenos para cada ciclo de menor jerarquía que permitieron conjeturar sobre sus posibles controles a escala secuencial.

GEOLOGÍA

La Cuenca Neuquina alcanza los 7000 metros de espesor y abarca 120000 km² de extensión areal (Yrigoyen 1991), cubriendo gran parte de la provincia del Neuquén, el Sur de Mendoza, el Sudoeste de La Pampa, y el Noroeste de Rio Negro. Sobre la base de su posición con respecto al arco y sus características en relación con la subducción de la placa proto-Pacífica, se la interpreta como una cuenca de backarc (Vergani *et al.* 1995; Urien *et al.* 1994; Giambiagi *et al.* 2009; Barredo y Stinco 2013, entre otros) que estuvo limitada al este y sur por áreas cratónicas, mientras que hacia el oeste se vinculaba con el arco magmático andino (Spalletti *et al.* 2014). Está compuesta por depocentros del tipo graben y hemigraben y zonas de transferencia que definieron depocentros desconectados entre sí (Mombrú y Uliana 1978; Barredo *et al.* 2008; Cristalini *et al.* 2009).

El relleno de la cuenca se asienta sobre depósitos neopaleozoicos y rocas permotriásicas volcánicas del Grupo Choiyoi sobre la que se depositaron secuencias volcánicas y epiclásticas de la etapa de *rift* (Ciclo Precuyano). Los depósitos marinos y continentales que sobreyacen este conjunto corresponden a las etapas de clímax del *rift* y el *post rift* y el gradual pasaje a la etapa de antepaís andino (Fig. 2). Tuvo lugar durante el Jurásico y el Cretácico (Uliana y Biddle 1989; Legarreta y Gulisano 1989) controlado por variaciones eustáticas y eventos tectónicos de escala gondwánica, mientras que las discontinuidades de menor rango (mayor frecuencia) fueron inducidas por el clima (Legarreta y Gulisano 1989; Barredo y Stinco 2013) (Fig. 2).

El área de estudio se puede subdividir estructuralmente en dos. El Engolfamiento Neuquino hacia el este, a su vez subdividido entre Flanco Oriental y el Sinclinal de Huantraico. Hacia el oeste, se encuentran el Macizo del Tromen y las Fajas Plegadas y Corridas (FPyC) de Malargüe, y del Agrio, estas últimas divididas por el Lineamiento de Cortaderas (Kozlowski *et al.* 1996) (véase Fig. 1C). El Flanco Oriental, corresponde a una plataforma estable en el extremo oriental del Engolfamiento Neuquino que se encuentra separada del Dorso de Los Chihuidos por el sinclinal del Bajo de Añelo y es segmentado por una serie de fracturas de basamento de tendencia noroeste y una serie de estructuras débilmente plegadas conocida como el sistema Entre Lomas (Mosquera y Ramos 2006).

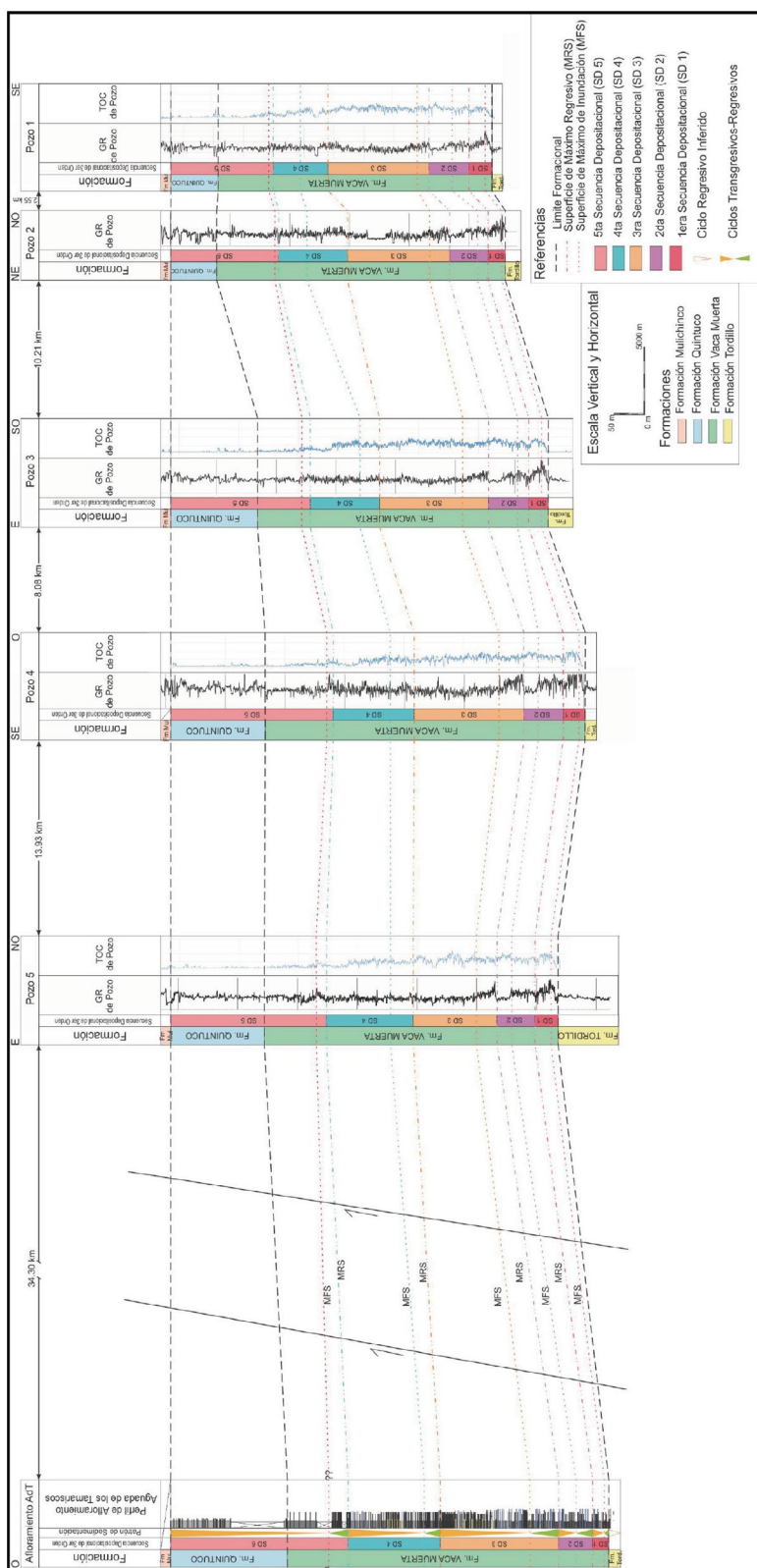


Figura 3. Panel de correlación entre los perfiles de superficie al oeste y los de subsuelo al este con los datos de materia orgánica, curva de color azul y los de GR. Las fallas dibujadas corresponden al frente de corrimientos que limita la FCyP. La sección está horizontalizada a la base de la Formación Mulichinco.

El sinclinal de Huantraico, localizado al oeste del área de El Trapial, corresponde a una zona profunda de cuenca que posibilitó la preservación más completa de la columna. En función de los trabajos Cristallini *et al.* (2013); Rojas Vera *et al.* (2015) y Dominguez *et al.* (2017 a y b), entre otros, se reconoce la presencia de una cubeta de orientación NW-SE cuya morfología tectónica dio lugar al engrosamiento diferencial de los espesores sedimentarios del área. Así, en el eje de la cubeta, la Formación Vaca Muerta registra el mayor espesor del intervalo rico en materia orgánica mientras que en el sector noroeste, en el sinclinal de Huantraico que corresponde el sector occidental del depocentro de Añelo (véase Fig. 1 C) la columna sedimentaria está incompleta. En el noreste del bloque El Trapial, la Formación Vaca Muerta se adelgaza contra este lineamiento estructural NO-SE que corresponde el borde oriental de la cubeta. El terreno Cerro Bayo, ubicado al norte de la zona de estudio, coincide con el alto estructural relacionado al emplazamiento del lacolito homónimo.

El intervalo de interés corresponde al Tithoniano-Valanginiano y está comprendido por dos unidades formacionales, Vaca Muerta (Weaver 1931) y Quintuco (Leanza *et al.* 2011) (véase Fig. 2). La depositación de este intervalo tuvo lugar en un ambiente de rampa carbonática mixta que evolucionó a una plataforma silicoclástica mixta hacia el tope de la secuencia (Legarreta y Gulisano 1989; Legarreta y Uliana 1996; Kietzmann *et al.* 2014, 2016; González Tomassini *et al.* 2014). El ambiente de rampa carbonática está representado por facies de cuenca, pasando por rampa externa, hasta rampa media distal, ya que en ocasiones se puede observar la influencia de olas de tormenta extraordinarias. El ambiente de plataforma silicoclástica mixto, está representado por facies de costa afuera (*offshore*) a facies de frente de playa (*shoreface*), las cuales se generaron por encima de nivel de olas de tormenta con la ocasional influencia de olas de buen tiempo. En líneas generales, la evolución del sistema marca una somerización de base a techo, y también se puede observar una disminución de la fracción carbonática hacia el tope de la secuencia.

La depositación de la Formación Vaca Muerta resultó mayormente de la decantación suspensiva de materiales terrígenos y no terrígenos de grano fino sobre un fondo óxico-subóxico hasta anóxico (Gasparini *et al.* 1997) y donde la productividad de carbonatos respondió ciclos de Milankovitch (Kietzmann *et al.* 2011). Kietzmann *et al.* (2016) reinterpreta parte de estos depósitos de grano fino, asociándolos a procesos esporádicos de retrabajo. La presencia de depósitos más gruesos fueron interpretados como corrientes de fondo que provocaron episodios eventuales de retrabajo, transporte y acumulación (Spalletti *et al.* 2008; Kietzmann *et al.* 2016), que habrían podido incrementar los niveles de oxígeno temporalmente. Asimismo, se reportaron depósitos turbidíticos por eventos tectónicos (Spalletti *et al.* 2008; Dominguez *et al.* 2017 a) o por inestabilidad de los depósitos durante las regresiones (Arregui 2014).

Las características clinoformas progradantes del Sistema Vaca Muerta-Quintuco se depositaron, como consecuencia de un rápido evento de inundación, en el Jurásico Tardío (Tithoniano) hasta el Cretácico Temprano (Berrasiano-Valanginiano). Dicha transgresión se dio a nivel regional y

favoreció las condiciones euxínicas asociadas a las secciones condensadas capaces de preservar la materia orgánica. Una vez que se estableció el equilibrio entre el aporte de sedimentos y el espacio de acomodación, comenzó la progradación de facies clásticas y carbonáticas más someras hacia el centro de cuenca (Legarreta y Uliana 1991; Sylwan *et al.* 2014). La Formación Vaca Muerta corresponde a los *foresets* y *bottomsets* de dichas secuencias (Mitchum y Uliana 1985), y están compuestas principalmente por pelitas, pero muchos intervalos de pelitas marino profundas y ricas en materia orgánica, está separadas por intervalos ricos en carbonatos que pueden ser reconocidos dentro de las secuencias. La abundante presencia de capas de cenizas volcánicas a lo largo de la unidad, evidencia que la cuenca fue afectada por la actividad del arco volcánico durante el Jurásico Tardío (Spalletti 2013).

Desde el punto de vista estratigráfico secuencial, la Formación Vaca Muerta está compuesta por dos secuencias depositacionales de 2do orden (Legarreta y Villar 2015). También ha sido subdividida por diversos autores en secuencias de tercer orden (Mitchum y Uliana 1985; Legarreta y Gulisano 1989; Kietzmann *et al.* 2016; entre otros). Esta subdivisión ha permitido entender la evolución tectosedimentaria de la cuenca, e identificar las facies más ricas en materia orgánica. En la zona de estudio se reconocieron 5 secuencias depositacionales de 3er orden (Fig. 3) que representan la transición del ambiente de rampa carbonática mixta al ambiente de plataforma silicoclástica mixta. Esta interpretación es en líneas generales consistente con otras propuestas como la de Kietzmann *et al.* (2014, 2016) y Gonzalez Tomassini *et al.* (2014). Las primeras secuencias depositacionales corresponden a cortejos transgresivos (TST) representados por secuencias retrogradacionales compuestas por facies de rampa externa a cuenca, que pasan nuevamente a rampa externa, con máximos de inundación (MFS) representados por las facies de cuenca. Los cortejos de mar alto (HST) están compuestos por intervalos progradacionales de rampa externa a rampa externa proximal, y de rampa externa a rampa media externa en algunos casos. En la porción superior de la secuencia (correspondiente al tope de la Formación Vaca Muerta y a la Formación Quintuco) los cortejos transgresivos (TST) están conformados por depósitos de rampa externa proximal a depósitos de cuenca, y depósitos de zona de transición a costa afuera (*offshore*). Mientras que los cortejos de mar alto están conformados por depósitos de costa afuera (*offshore*) a zona de transición, llegando en algunos casos a depósitos de frente de playa (*shoreface*) (Fig. 3).

CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS DE LA FORMACIÓN VACA MUERTA

Los estudios geoquímicos de Legarreta y Villar (2011), Villar (2014), muestran que en la región de interés la MO se caracteriza por ser poco estructurada y generada durante la diagénesis temprana anaeróbica a disaeróbica de fitoplancton/algal-bacterial. La participación de materia orgánica terrestre es escasa en la región central de cuenca y aumenta hacia el oeste (Yesera del Tromen-Puerta Curaco).

El porcentaje de carbono orgánico total (COT, % en peso) promedia el 7% en la zona de estudio aunque muestra una fuerte variación vertical con valores que van desde 3-5% en los primeros 200 m de espesor de la unidad y pasa a 8% al 10% de COT en el intervalo basal comúnmente denominado “cocina” (Stinco y Mosquera 2003; Legarreta y Villar 2011; Gutierrez Schmidt *et al.* 2014; Cuervo *et al.* 2016). El espesor de los niveles ricos en materia orgánica fue caracterizado a través del método de Passey *et al.* (1990) por Legarreta y Villar (2011) y Gutierrez Schmidt *et al.* (2014), quienes estiman que varía desde de 800 m en el centro de cuenca a 50 m en los bordes, con un promedio de 300 m para la provincia de Neuquén. Las mayores concentraciones de MO están asociadas a rendimientos de picos S2 de pirolisis, que varían entre 10 y 50 mg HC/g de roca, rara vez alcanzando los 90 mg HC/g de roca en zonas medio o poco maduras (Villar 2014). Los índices de hidrógeno (IH), en los especímenes representativos de baja madurez, presentan valores de alrededor de 650 mg HC/g COT, a pesar de que en capas específicas puede pasar los 750 mg HC/g TOC. Los índices de oxígeno (IO) están por debajo de 30-40 mg CO₂/g TOC (Villar 2014). En consecuencia, la clasificación del kerógeno, sugiere tipos I/II en el diagrama de OH vs IO (Legarreta y Villar 2011).

La madurez (Romax) corresponde a 0.8% hasta 2% (Legarreta y Villar 2011; Villar 2014) y se estima que fue principalmente el resultado del soterramiento, aunque no se descartan fuentes de calor adicionales producto de la actividad volcánica cercana (Legarreta *et al.* 2005, Sigismondi 2012). La madurez termal varía de mediana a etapas avanzadas de gas y condensados (intervalo ~ 2000 a ~ 4000 m) (Villar 2014). Para este autor, los datos de pirolisis sobre rocas de subsuelo llegan a Tmax que superan los 455°C, por lo que la madurez termal se encuentra en ventana de generación tardía de petróleo y gas y condensado.

ANÁLISIS DE DATOS Y DISCUSIÓN

Poder caracterizar una roca generadora requiere conocer las características integrales de la cuenca que la contiene y de su evolución tectosedimentaria a lo largo del tiempo (Tyson 2005; Chen *et al.* 2006; Sun *et al.* 2013, entre otros). Las secuencias depositacionales y los ciclos estratigráficos resultan de la interacción del aporte de sedimentos, el espacio de acomodación disponible (ambos a su vez con componentes tectónicas), las variaciones eustáticas/estratigráficas y las variaciones climáticas (Jervey 1988; Allen y Allen 2013; Barredo y Stinco 2013, entre otros). Por eso se establece que la acumulación y preservación de materia orgánica (MO) depende no solo de la bioproductividad sino también de las condiciones de cuenca que controlan la tasa de sedimentación, la mineralogía, especialmente de las arcillas, los niveles de oxigenación de la columna de agua y la dilución (Passey *et al.* 2010). En particular la tasa de sedimentación y su distribución en tiempo y espacio dependen de la magnitud y duración de las variaciones del nivel del mar y su interacción con el relieve irregular probablemente inducido por bioconstrucciones

y/o antiguos resaltos del zócalo o basamento resultantes de la rigidez flexural de la litosfera (Bartol y Govers 2009; García-Castellanos y Villaseñor 2011, entre otros). Se propone en este trabajo que el aporte sedimentario, las morfologías estructurales carbonáticas pero también el relieve tectónico y su evolución, condicionaron la llegada de sedimentos a distintos sectores del centro cuenca que propiciaron condiciones locales en la conservación de la materia orgánica.

La Formación Vaca Muerta se depositó durante la etapa de *post-rift* de la cuenca Neuquina (Gulisano y Gutierrez Piembling 1994; Fernández Seveso *et al.* 1996; Cruz *et al.* 1999, entre otros). La subsidencia térmica de esta etapa estuvo en parte afectada por episodios de inversión de antiguas estructuras extensionales (Vergani *et al.* 1995; Manceda y Figueroa 1993; Cristallini *et al.* 2009, entre otros) y por el inicio de una subsidencia flexural del comienzo de la etapa de antepaís del margen gondwánico (Ramos 2000, Franzese *et al.* 2004; Rincón *et al.* 2010, entre otros) ambas con influencia de la fábrica del basamento heredada de la etapa de *rift* (Barredo y Stinco 2013, Dominguez *et al.* 2017 a y b). La primer ingresión marina de la base de la Formación Vaca Muerta se desarrolló sobre un substrato regionalmente suave del techo de la Formación Tordillo, pero entre el Tithoniano tardío–Berriasiano, un incremento de la actividad tectónica dio lugar al alzamiento de los altos Loma la Lata, Puerta Curaco, Cerro Arena (Dorso de los Chihuidos) y, marcada subsidencia en los ejes de orientación NO-SE Chos Malal, Pichana y Añelo; (Veiga *et al.* 2001; Domínguez *et al.* 2017ayb) (véase Fig. 1). Kietzmann *et al.* (2014) observaron este relieve al advertir la profundización desde la zona de afloramientos de Yesera del Tromen-Puerta Curaco hacia el este (bajo de Añelo). Concluyeron que el Cerro Arena y los sistemas extensionales jurásicos pudieron ejercer un control de primer orden en la distribución de las facies sedimentarias. Los antiguos depocentros de *rift* fueron además, mayormente asimétricos en sección (Legarreta y Uliana 1991), con desarrollo de hombreras que, como resultado de compensación isostática, se elevaron diferencialmente (Barredo *et al.* 2008; Cristallini *et al.* 2009). Se interpreta aquí que siendo la litosfera rígida elásticamente, el ajuste flexural ante la carga de origen tectónico (arco magmático), carga por agua y sedimentos permitió que los antiguos bloque rotados experimenten alzamiento aún en la etapa de subsidencia termal (Barredo y Stinco 2013).

El control en la sedimentación de algunos sectores de la cuenca pudo deberse también a la presencia de estos resaltos que así pudieron condicionar la circulación interna y con ello la distribución de los sedimentos. Leanza *et al.* (2003), Spalletti *et al.* (2008) y Arregui (2014), también mencionan que durante los descensos del nivel de base, la sedimentación en exceso y en desequilibrio, pudo haber avanzado hacia las porciones centrales de la cuenca favorecidos por la existencia de una pendiente con gradiente elevado, el contraste mecánico litologías y la posible presencia de sobrepresiones. En estos periodos y favorecido por las fuertes regresiones se desarrollaron además construcciones carbonáticas en el quiebre de pendiente de la plataforma que actuaron como barreras de la sedimentación hacia la cuenca (Arregui 2014). En particular en la región occidental en el eje Chos Malal (véase Figura 1), con aporte desde el arco se registraron

flujos importantes hacia las zonas más profundas (Mb. Huncal) (Gulisano *et al.* 1984; Mitchum y Uliana 1985; Legarreta y Uliana 1991; Leanza *et al.* 2003; Spalletti *et al.* 2013).

Por otro lado, Spalletti *et al.* (2014) resaltan la importancia del clima como control en la acumulación de la MO de la porción basal de la Formación Vaca Muerta. Los estudios de Volkheimer *et al.* (2008), Barredo y Stinco (2013) y Spalletti *et al.* (2014) establecen que el clima fue templado y predominantemente seco pero que hacia el Cretácico las estaciones húmedas se tornaron más importantes. La presencia de vertebrados de aguas cálidas sugiere además que la temperatura promedio era de 20° (Volkheimer *et al.* 2008). En estas condiciones se habría posibilitado la estratificación del agua con el desarrollo de una termopícnoclina por debajo de la base del tren de olas de tormenta (Spalletti *et al.* 2014). La masa de agua tuvo así una porción somera bien oxigenada que facilitó la producción orgánica (Gasparini *et al.* 1997) y un nivel inferior con condiciones subóxicas/anóxicas que en algunos sectores de la cuenca fue favorecido por la paleotopografía que condicionaba las corrientes de fondo.

Al comienzo de la depositación de la Formación Vaca Muerta la tendencia general del sistema fue transgresiva representado por un ambiente de rampa mixta (Gulisano *et al.* 1984; Legarreta y Uliana 1991; Spalletti *et al.* 2008; Kietzmann *et al.* 2016, entre otros) mientras que hacia el techo de la unidad la tendencia general fue regresiva con formación de ambientes de plataforma silicoclástica mixta (Gulisano *et al.* 1984; Leanza *et al.* 1991; Kietzmann *et al.* 2016, entre otros). El patrón de apilamiento cíclico que se observa tanto en los perfiles de afloramiento como los perfiles de rayos gamma muestran buena correlación con las curvas de alta frecuencia de Haq y Shutter (2014) por ello fue posible analizar la presencia de MO desde el punto de vista del control eustático (Figs. 3 y 4).

Durante las transgresiones se depositaron margas, fangolitas, pelitas arcillosas, carbonosas (ricas en MO) y fosilíferas, tufitas y tobas. La composición mineralógica dominante de estas facies consiste en abundante cuarzo que puede superar el (60%) en muestras de afloramiento; feldespatos (plagioclasa sódica) (20%), dolomita (10%), pirita (4-5%) y escasa calcita (8%) (Fig. 4). El cuarzo es fundamentalmente de origen terrígeno lo mismo que las plagioclasas. Estos minerales se asocian a elevada participación de Al_2O_3 (17%) y TiO_2 (0,49%) proveniente de la generación de argilominerales (illita/smectita, y bajas proporciones de clorita ferrosa y caolinita); en subsuelo estos últimos alcanzan un total de 30% pero disminuyen hacia el oeste en la zona de afloramientos (promedio 15%).

La composición química de las pelitas arcillosas en la base de la unidad es: Ni (>120 ppm), Mo (100 ppm), V (950 ppm) As (27 ppm) y Cr (promedio de 90 ppm puede superar 200 ppm) datos consistentes con los obtenidos por Nawratil *et al.* (2012); Larriestra y Merino (2014); hay además S (4%) (Fig. 4). Hacia la sección media de la formación y siempre durante las transgresiones, la presencia de Ni (90 ppm) y Mo baja con relación a estos niveles basales (30-40 ppm) lo que permite suponer que las aguas eran algo más oxigenadas y los ambientes de acumulación disódicos.

La mayor concentración de MO se dio en la base de la formación en el primer evento transgresivo (Legarreta y Villar 2011; Villar 2014; Aguirre 2014; entre otros), donde excepcionalmente puede alcanzar un 10% y con un promedio del 7%, estos datos son consistentes con los obtenidos por Legarreta (2016) y Kietzman *et al.* (2016). Sin embargo, las variaciones laterales y verticales en la concentración y tipo de materia orgánica de esta unidad sugieren que la bioproductividad no fue uniforme (Sagasti *et al.* 2014; Stinco y Barredo 2014; Spalletti *et al.* 2014; entre otros). En los afloramientos del área de Chos Malal, (Puerta Curaco y Yesera del Tromen) los kerógenos son III y IV (materia leñosa) asociados a la rampa externa pero hacia el este y centro de la cubeta, son del tipo I y II derivado de fitoplancton en un ambiente más profundo de cuenca y con escaso aporte sedimentario (Legarreta *et al.* 2005; Legarreta y Villar 2011; Villar 2014).

Las condiciones climáticas, las tasa de (Al_2O_3) y la baja relación Ti/Al en las pelitas organógenas sugieren un ambiente con alto aporte de nutrientes (P y N) en la zona fótica. Es común observar nódulos de fosfato en la unidad y su presencia (1,27%) se estima que proviene del apatito. Este elemento usado por los organismos para construir sus esqueletos de manera que es un buen indicador de productividad. La presencia de Moes importante en la fijación biológica del N (Tuit *et al.* 2004). Esto permitió el crecimiento de fitoplancton y organismos mientras que la mezcla de aguas facilitó la formación de bioagregados por mezcla mineral probablemente favorecido por la presencia de macroalgas. Se estima que el ambiente era restringido en la zona de estudio, probablemente por la morfología del substrato de la cuenca, lo que favoreció que los flóculos, que son de baja densidad, no fueran retransportados lateralmente por advección y flujos horizontales una vez depositados. Según Kietzmann *et al.* (2016), la tasa de sedimentación fue del 25 cm por cada mil años lo que aseguró la preservación de la MO de una dilución importante. Asimismo, y sobre la base del trabajo de Kennedy *et al.* (2002) se estima aquí que las arcillas presentes en las margas (~ 25%) ayudaron en la fijación de compuestos de carbono en su superficie.

Las condiciones de anoxia/suboxia quedan claro en la relación Sr/Ba and V/Ni la presencia de pirita y la anomalía de Ce (52 ppm) que indica muy baja tasa de sedimentación (Fig. 4). Son claros indicadores también el bajo aporte de Ca (8%), la nula bioturbación de las arcilitas laminadas, el enriquecimiento en MO y Ni y la presencia de Zn (25%), V, Cu (20%), As y Cr (200 ppm). La anoxia se vio favorecida además por la alta participación orgánica en la columna de agua que demandó oxígeno. Por otro lado, la elevada proporción relativa de U (26 ppm) y V (950 ppm) puede considerarse como una medida de las condiciones de redox y también sugieren baja tasa de sedimentación (Tribovillard *et al.* 2004). En el caso del uranio porque se fija en la MO y es insoluble en condiciones reductoras, el V y Cr porque son removidos de la columna de agua en condiciones anóxicas (Tribovillard *et al.* 2004). Asimismo el Cd (máximo de 15 ppm para el máximo de U detectado), Cu, Ni y el Zn son insolubles en la presencia de H_2S y retenidos junto con la pirita, y así son comunes en fondos anóxicos. Según Tribovillard *et al.* (2004), son micronutrientes por ello se usan como proxy para analizar el contenido de materia orgánica.

En el momento de nivel de mar alto (HST) con el aumento en la creación de espacio de acomodación, baja energía y aun escaso aporte de sedimentos, se depositaron fangolitas limosas, *wackestones* bioclásticos, facies de *wackestones* bioturbados, *wackestones* intraclástico, *packstones* intraclásticos donde predominó la precipitación de micrita. Algunos niveles presentan mayor retrabajo por ola de tormenta con formación de *grainstones* bioclásticos y con *hummocky cross stratification*. Estas facies registran un aumento en la presencia de Ca (25%) y alta relación Si/Al, Ti/Al y Zr/Nb. El enriquecimiento de calcio se estima que fue aportado por los bioclastos de manera que las condiciones eran más oxigenadas. Así también se observa un aumento de bioturbación en las fangolitas y la presencia de microbialitas y delgadas construcciones algales.

La presencia de MO es moderada a baja (< 3) lo mismo que los niveles de Ni y Mo (< 10 ppm). Los mayores valores registrados se ubican en la base, en la transición de los cortejos TST-HST. Hacia la MI (máxima inundación) se registra una mayor participación de Ca ($> 50\%$) y Sr (> 1200 ppm) y menor presencia de cuarzo, arcillas y feldespatos y de los elementos Zr, Th y Nb por disminución de aporte detrítico. Se estima que las concreciones carbonáticas que dominan en particular en la base de la formación, son diagenéticas tempranas resultantes de esta baja tasa de aporte de sedimentos. Cuando se habría alcanzado el espesor de agua suficiente para la depositación de los carbonatos se depositaron *mudstones* carbonáticos, *bindstones* microbianos y *grainstones* bioclásticos (pueden superar el 65%) también pelitas y pelitas fosilíferas con una tasa de sedimentación aún baja para poder facilitar la producción de carbonatos que diluyeran la materia orgánica (Milliken y Day-Stirrat 2013) por la formación de fangos carbonáticos. Mineralógicamente hay moderados a bajos valores de cuarzo, feldespato y plagioclasa (promedio 18%) y arcillas (3%-5%). Estas rocas presentan Ca (70%), Sr (en particular en las margas), Ba y Mg y escaso Si biogénico desde radiolarios y espículas de esponjas ($< 5\%$) (Fig. 4).

A medida que el descenso se hizo más marcado, el antiguo relieve de la rampa mixta fue también sometido a erosión y retrabajo en un sistema de mayor energía lo que permitió la llegada de sedimentos a zonas antes restringidas con formación de turbiditas y fuerte disminución de la presencia de materia orgánica (2%). Según Kietzmann *et al.* (2016) la tasa de sedimentación fue 50–60 cm/k.y. Se depositaron fangolitas y areniscas finas con cuarzo, feldespatos (Pl), arcillas (18%) enriquecidas en Al, Ti, el Al_2O_3 y TiO_2 por la generación de argilominerales como productos de alteración de componentes primarios durante la exposición subaérea y, Th, Zr, Nb, y Rubidio (Rb).

Hacia el techo de la Formación Vaca Muerta y en condiciones de plataforma (*offshore*) durante el momento de nivel del mar alto (HS) se observa un aumento de la participación de cuarzo y plagioclasa (aporte de terrígenos) y una disminución de la calcita. Se destaca el continuo enriquecimiento de illita con relación al interestratificado I/S debido a la disminución de la participación volcánica, y la presencia de cloritas. En el estadio transgresivo hay un incremento de facies carbonáticas y por ende la concentración de materia orgánica es baja (menor a 2%). En las etapas regresivas (regresión normal) las arcillas alcanzan 22 y 40% debido a que el aporte

detritico quedó restringido a las porciones costeras mientras que cuenca adentro, se alcanzan las condiciones de preservación, por ello se registró la presencia de escaso uranio asociado a baja concentración de MO pero sobre todo de torio y potasio.

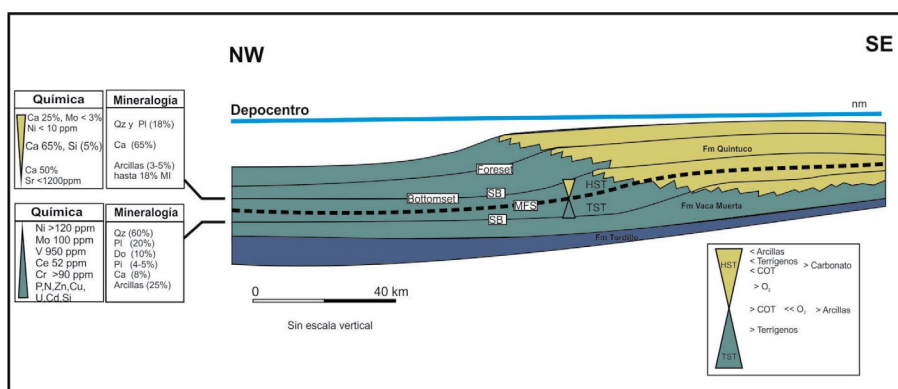


Figura 4. Esquema representativo de las clinoforras características de la Formación Vaca Muerta. Se destacan los ciclos T-R y la mineralogía y química característica de cada uno de los cortejos. SB límite de secuencia (sequence boundary), MFS máxima inundación (maximum flooding surface). HST nivel del mar alto (high stand), TST cortejo transgresivo (Transgressive system track), nm nivel del mar.

CONCLUSIONES

La Formación Vaca Muerta se depositó durante la etapa de post-*rift* de la cuenca controlada por las variaciones del nivel mar y también por la paleotopografía. De esta manera la producción y conservación de la materia orgánica estuvieron muchas veces ligadas a condiciones locales en particular durante el intervalo Tithoniano-Berriasiano. Las condiciones de anoxia/suboxia que se desprende de la composición mineralógica y química de muestras de subsuelo y afloramiento se asocian con sectores restringidos de la cubeta, en particular hacia la depresión de Añelo. Si bien los márgenes del antiguo *rift* no constituyeron una barrera evidente para el ingreso de sedimentos en la base de la formación y durante la primera transgresión marina, se estima que sí pudieron alterar la circulación de fondo lo que favoreció la acumulación de la materia orgánica mientras que en los sectores someros de ese mar la bioproductividad fue alta. Posteriormente y con la estructuración de la cuenca durante el alzamiento y subsidencia diferencial, se acentuaron las condiciones locales en particular en la zona de estudio mayormente comprendida entre el alto Cerro Arena (Dorso de los Chihuidos) y la depresión de Añelo. El depocentro tuvo las características de cuenca restringida con la columna de agua estratificada y desarrollo de un fondo anóxico/subóxico y reductor que permitió la importante acumulación y preservación de la materia orgánica de la base de la formación.

Durante la tendencia regresiva del sistema, el aporte de sedimentos hacia este bajo aumentó con la consecuente baja en la bioproductividad y fuerte disminución de la presencia de materia orgánica.

Hacia el techo de la Formación Vaca Muerta y en condiciones de plataforma silicoclástica (*offshore*), la acumulación de materia orgánica está asociada a las etapas regresivas y limitada a las porciones distales de cuenca adentro.

La clara relación entre los ciclos depositacionales y la acumulación de la materia orgánica conjuntamente con los controles de mayor jerarquía de la cuenca (transición hacia la etapa de antepaís) han permitido identificar zonas de mayor concentración de materia orgánica (COT) a lo largo de la columna sedimentaria de la unidad que es consistente con datos obtenidos previamente.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a la empresa Chevron por los datos aportados.

REFERENCIAS CITADAS

- Allen, P.A. y Allen, J.R., 2013. Basin Analysis: Principles and Application to Petroleum Play Assessment. Third edition. Blackwell Scientific Publication, 632 p, Wiley-Blackwell ISBN 978-0-470-67376-8
- Arregui, C., 2014. Ciclos deposicionales de las Formaciones Quintuco y Vaca Muerta: génesis y evolución del área central – Cuenca Neuquina. IX Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Actas: 89-207. IAPG, Mendoza.
- Barredo, S. y L. Stinco, 2013. A Geodynamic View of Oil and Gas Resources Associated to the Unconventional Shale Reservoirs of Argentina. Unconventional Resources Technology Conference (URTeC). ID: 1593090.
- Barredo, S., E. Cristallini, O. Zambrano, G. Pando, y R. García, 2008. Análisis tectosedimentario del relleno de edad precuyana y cuyana inferior de la región septentrional del alto de Kauffman, Cuenca Neuquina. VII Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos; Actas 443-446 p
- Bartol, J. y Govers, R., 2009. Flexure due to the Messinian-Pontian sea level drop in the Black Sea. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 10, Q10013. doi:10.1029/2009gc002672.
- Cristallini, E.O., G. Bottesi, D. Pérez, R. Tomezzoli, R. Cómeron, R. Varadé, N. Vitulli, G. Bojarski, O. Pioli, E. Zardo, G. Olea, L. Cortés, J. Ramirez, D. Mallimaci, G. Vemales y M. Grinberg, 2002, Fracturación regional en el norte de Neuquén y sur de Mendoza. V Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Trabajos Técnicos, Actas en CD, 16 pp.
- Cristallini, E., Pando, G., Martinez, J.M., Buhler, M., Tomezzoli, R., Barredo, S. y Zambrano, O., 2009. Controles precuyanos en la estructura de la Cuenca Neuquina. XVII Congreso Geológico Argentino. Revista de la Asociación Geológica Argentina 65 (2): 248-264. ISSN: 0004-4822
- Cristallini, E., J. Likerman, L. Gallo, R. Tomezzoli, M. Fantín, y D. Sotelo, 2013, Caracterización estructural y evolución tectónica del bloque El Trapial (Provincia del Neuquén). Informe inédito, p. 38, Universidad de Buenos Aires.
- Chen, J.F., Zhang, S.C., Sun, S.L., Wu, Q.Y., 2006. Main factors influencing Marine carbonate source rock formation. *Aata Geol. Sin.* 80, 467e472 (in Chinese with English abstract).

- Cruz, C.E., Robles, F., Sylwan, C.A y Villar, H.J., 1999. Los sistemas petroleros jurásicos de la Dorsal de Huincul. Cuenca Neuquina. Argentina. IV Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos. Instituto Argentino del Petróleo y del Gas. Tomo I: 175-195. Buenos Aires.
- Cuervo, S., Lombardo, E., Vallejo, D., Crousse, L., Hernandez, C. y Mosse, L., 2016. Towards a Simplified Petrophysical Model for the Vaca Muerta Formation. Unconventional Resources Technology Conference. doi:10.15530/URTEC-2016-2437257
- Domínguez, R.F., Cristallini, E y Leanza, H.A., 2017a. Evolución tectono-sedimentaria del Sistema Vaca Muerta-Quintuco (Tithoniano a valanginiano Inferior) en el engolfamiento Neuquino, Argentina. XX Congreso Geológico Argentino, Actas: 31-37. San Miguel de Tucumán.
- Domínguez, R.F., Fantin, M.A y Cristallini, E., 2017b. Configuración morfo-estructural de la Cuenca Neuquina durante la depositación del sistema Vaca Muerta-Quintuco. XX Congreso Geológico Argentino, Actas: 46-52. San Miguel de Tucumán.
- Embry, A.F. y E.P. Johannessen, 1992. T-R sequence stratigraphy, facies analysis and reservoir distribution in the uppermost Triassic-Lower Jurassic succession, western Sverdrup Basin, Arctic Canada. Arctic Geology and Petroleum Potential. Norwegian Petroleum Society, Special Publication 2: 121-146.
- Fernandez-Seveso, F., Figueroa, D.E. and Rodriguez, H., 1996. Gas play opportunities in deeper Jurassic sequences of the Neuquén basin embayment, Argentina. AAPG Bulletin, 80(CONF-9609255-).
- Franzese, J.R., Salas, R. y Muravchik, M., 2004. Análisis 2D de la subsidencia en la Cuenca Neuquina (República Argentina): un caso de superposición de mecanismos de subsidencia en cuencas marginales. Revista Geotemas. Sociedad Geológica de España 6: 123-128.
- García-Castellanos, D. y Villaseñor, A., 2011. Messinian salinity crisis regulated by competing tectonics and erosion at the Gibraltar Arc. Nature 480, 359-363.
- Gasparini Z., Spalletti L.y De La Fuente M., 1997. Tithonian marine reptiles of the Western Neuquén Basin, Argentina. Facies and palaeoenvironments. Geobios, 30(5), pp.701-712.
- Giambiagi, L., M. Tunik, S. Barredo, F. Bechis, M. Ghiglione, P. Alvarez, y M. Drosina, 2009. Cinemática de la apertura del sector norte de la Cuenca Neuquina. Revista de la Asociación Geológica Argentina 65 (2):278-282.
- González Tomassini, F., Kietzmann, D.A., Fantín, M.A., Crousse, L.C. and Reijenstein, H.M., 2014. Estratigrafía y análisis de facies de la Formación Vaca Muerta en el área de El Trapial, Cuenca Neuquina, Argentina. In IX Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos IAPG, Mendoza, Argentina.
- Gulisano, C., A. Gutiérrez Pleimling y R. Digregorio, 1984. Análisis estratigráfico del intervalo Tithoniano-Valanginiano (Formaciones Vaca Muerta, Quintuco y Mulichinco) en el suroeste de la provincia de Neuquén. 9 Congreso Geológico Argentino, Actas, 1, pp. 221-235.
- Gulisano, C., Gutiérrez Piembling, A., 1994. Field trip Guidebook, Neuquina Basin, Neuquén Province, 4th International Congress on Jurassic Stratigraphy and Geology 150.
- Gutiérrez Schmidt, N., J.C. Alonso., A. Giusiano, C. Lauri y T. Sales, 2014 "El shale de la Formación VacaMuerta: integración de datos y estimación de recursos de petróleo y gas asociado, provincia de Neuquén"IX Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos Simposio de Recursos No Convencionales: Ampliando el Horizonte Energético, p. 795-813.

- Haq, B.U. y Shutter, S.R. 2008. A chronology of Paleozoic sea-level changes. *Science* (322): 64-68.
- Jervey, M.T., 1988. Quantitative geological modelling of siliciclastic rock sequences and their seismic expression. En: Wilgus, C.K., Hastings, B.S., Kendall, C.G., Posamentier, H.W., Ross, C.A., Van Wagoner, J.C. (Eds.), *Sea-Level Changes-An integrated approach*: SEPM Special Publication. Soc. Econ. Paleontol. Mineral., Tulsa, pp. 47-69.
- Kennedy, M.J., Pevear, D.R. y Hill, R.J., 2002. Mineral surface control of organic carbon in black shale. *Science* 295, 657e660.
- Kietzmann, D.A., Martin-Chivelet, J., Palma, R.M., López-Gómez, J., Lescano, M., Concheyro, A., 2011. Evidence of precessional and eccentricity orbital cycles in a Tithonian source rock: the mid-outer carbonate ramp of the Vaca Muerta Formation, Northern Neuquén Basin, Argentina. *AAPG bulletin*, 95(9), pp.1459-1474.
- Kietzmann, D., R. Palma, A. Riccardi, J. Martín-Chivelet y J. López-Gómez, 2014. Sedimentology and sequence stratigraphy of a Tithonian-Valanginian carbonate ramp (Vaca Muerta Formation): A misunderstood exceptional source rock in the Southern Mendoza area of the Neuquén Basin, Argentina. *Sedimentary Geology* 302: 64-86.
- Kietzmann D.A., Ambrosio A.L., Suriano J., Alonso M.S., Tomassini F.G., Depine G., Repol, D., 2016. The Vaca Muerta-Quintuco system (Tithonian-Valanginian) in the Neuquén Basin, Argentina: A view from the outcrops in the Chos Malal fold and thrust belt. *AAPG Bulletin*, 100(5): 743-771.
- Kozłowski, E.E., Cruz, C.E. y Sylwan, C.A. 1996. Geología estructural de la zona de Chos Malal, cuenca Neuquina, Argentina. 13° Congreso Geológico Argentino y 3° Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Actas 1: 15-26. Buenos Aires.
- Larriestra, C., y R. Merino, 2014, High Resolution Non-Destructive Chemostratigraphy of Vaca Muerta Formation, Argentina: New Evidence of Black Shale Sedimentary Features: Search and Discovery Article #41310. Web accessed June 24, 2015
- Leanza, H.A., H.G. Marchese y J.C. Riggi, 1977, Estratigrafía del Grupo Mendoza con especial referencia a la Formación Vaca Muerta entre los Paralelos 35° y 40° l.s. Cuenca Neuquina-Mendocina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 32 (1978): 190-208.
- Leanza H.A., Sattler, F., Martínez, R.S. y Carbone, O. 2011. La Formación Vaca Muerta y equivalentes (Jurásico Tardío-Cretácico Temprano), en la Cuenca Neuquina, Argentina. *Relatorio XVII Congreso Geológico Argentino*. Neuquén: 113-129. Buenos Aires.
- Leanza, H.A., Hugo, C.A., Repol, D. y Salvarredy, M., 2003. Miembro Huncal (Berriasiano inferior): un episodio turbidítico en la Formación Vaca Muerta, Cuenca Neuquina, Argentina *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 58 (2): 248-254 (2003).
- Legarreta, L. y C.A. Gulisano, 1989, Análisis estratigráfico de la Cuenca Neuquina (Triásico Superior-Terciario Inferior). En: Chebli, G.A. y L.A. Spalletti (eds.), *Cuencas Sedimentarias Argentinas*. Simposio Cuencas Sedimentarias Argentinas, Serie Correlación Geológica 6: 221-243, Tucumán.
- Legarreta, L. y H. Villar, 2011. Geological and Geochemical Keys of the Potential Shale Resources, Argentina Basins. *Search and Discovery Article #80196* (2011).
- Legarreta, L., Villar, H.J., 2015. The Vaca Muerta Formation (Late Jurassic-Early Cretaceous), Neuquén Basin, Argentina: Sequences, facies and source rock characteristics: Unconventional Resources Technology Conference. In *Extended Abstracts*.

- Legarreta, L. y Uliana, M.A., 1991. Jurassic–Cretaceous marine oscillations and geometry of back-arc basin, Central Argentina Andes. En: McDonald, D.I.M. (Ed.), Sea Level Changes at Active Plate Margins: Process and Product. International Association of Sedimentologists, Special Publication, 12, pp. 429–450.
- Legarreta, L., Uliana, M.A., 1996. The Jurassic succession in west-central Argentina: stratal patterns, sequences and paleogeographic evolution. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 120(3-4), pp.303-330.
- Legarreta, L. y H. Villar, 2011. Geological and Geochemical Keys of the Potential Shale Resources, Argentina Basins. Search and Discovery Article #80196 (2011).
- Legarreta, L., H. Villar, G. Laffitte, C. Cruz y G. Vergani, 2005. Cuenca Neuquina: balance de masa enfocado a la evaluación del potencial exploratorio de los distritos productivos y de las zonas no productivas. VI Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos. Instituto Argentino del Petróleo y del Gas.
- Manceda, R. y Figueroa, D., 1993. La inversión del *rift* mesozoico de la faja fallada y plegada de Malargüe. Provincia de Mendoza. 12 Congreso Geológico Argentino y 2 Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Actas, 3, pp. 219–232.
- Milliken, K.L. y R.J. Day-Stirrat, 2013. Cementation in mudrocks: brief review with examples from cratonic basin mudrocks, in Chatellier, J.-Y., and Jarvie, D.M., eds., Critical Assessment of Shale Resource Plays: American Association of Petroleum Geologists, Memoir 103, p. 133–150.
- Mitchum, R.M. y M. Uliana, 1985, Seismic stratigraphy of carbonate depositional sequences, Upper Jurassic-Lower Cretaceous, Neuquén Basin, Argentina. En: Berg, B.R. y Woolverton, D.G. (eds.) Seismic Stratigraphy 2. An integrated approach to hydrocarbon analysis. American Association of Petroleum Geologists, Memoir 39: 255-83, Tulsa.
- Mombrú, C.A. y Uliana, M.A., 1979. Esquema tectosedimentario de la Cuenca Mesozoica de Mendoza y Neuquén. In 7th Congreso Geológico Argentino, Actas (Vol. 2, pp. 239-256).
- Mosquera, A., Ramos, V.A., 2006. Intraplate Deformation in the Neuquén Embayment. Geological Society of America. Special Paper 407.
- Nawratil, A., H. Gomez, y C. Larriestra, 2012, Key Tools for Black Shale Evaluation: Geostatistics and Inorganic Geochemistry Applied to Vaca Muerta Formation, Neuquén Basin, Argentina: Search and Discovery Article #41028. Web accessed June 24, 2015.
- Passey, Q., Creaney, S., Kulla, J., Moretti, F. y Stroud, J., 1990. A practical model for organic richness from porosity and resistivity logs. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 74: 1777-1794.
- Passey, Q.R., Bohacs, K.M., Esch, W.L., Klimentidis, R. y Shina, S., 2010. From oil-prone source rock to gas-producing shale reservoir – geologic and petrophysical characterization of unconventional shale gas-oil reservoirs. International oil and gas Conference and exhibition in China. SPE 131350: 29p. China.
- Ramos, V.A., 2000. The Southern central Andes. En: Cordani, U.G., Milani, E.J., Thomaz Filho, A y Campos, D.A. (editors): Tectonic Evolution of South America. 31 st International geological Congress: 561-604. Brasil
- Ratcliffe, K.T. y Wright, A.M., Schmidt, K. 2012. Application of inorganic whole-rock geochemistry to shale resource plays: an example from the Eagle Ford Shale Formation, Texas. The Sedimentary Record: 10 (2): 4-9.

- Rincón M.F., Barredo S.P., Zunino J., Salinas A., Reinante S.M.E. y Manoni R., 2011. Síntesis general de los bolsones intermontanos de San Juan y La Rioja. En: Kowlowsky E, Legarreta L, Boll A, editors. *Cuencas Sedimentarias Argentinas*. XIII Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos: 321-406. Mar del Plata.
- Rojas Vera E.A., Mescua J., Folguera A., Becker T.P., Sagripanti L., Fenell L., Orts D. y Ramos V.A., 2015. Evolution of the Chos Malal and Agrio fold and thrust belts, Andes of Neuquén: Insights from structural analysis and apatite fission track dating, *Journal of South American Earth Sciences*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2015.10.001>
- Sigismondi, M. 2012. Estudio de la deformación litosférica de la cuenca Neuquina: estructura tectónica, datos de gravedad y sísmica de reflexión. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. Tesis doctoral (inédita), 381 p.
- Sagasti, G., Foster, M., Hryb, D., Ortiz, A. y Lazzari, V., 2014. Understanding geological heterogeneity to customize field development: An example from the Vaca Muerta unconventional play, Argentina. *Unconventional Resources Technology Conference (URTEC)*.
- Spalletti, L.A., 2013. Influencia del arco magmático protoandino en la acomodación sedimentaria, la fisiografía y las características de los depósitos del Jurásico superior y Cretácico inferior en la Cuenca Neuquina. *Anales de la Academia nacional de ciencias Exactas y naturales de Buenos Aires*, 65: 37-47.
- Spalletti, L.A., Schwarz, E y Veiga, G.D., 2014. Geoquímica inorgánica como indicador de procedencia y ambiente sedimentario en sucesiones de lutitas negras: los depósitos transgresivos titonianos (Formación Vaca Muerta) de la Cuenca Neuquina, Argentina. *Andean Geology* 41 (2): 401-435.
- Spalletti, L., Gasparini, Z., Veiga, G., Schwarz, E., Fernández, M. y Matheos, S. 1999. Facies anóxicas, procesos deposicionales y herpetofauna de la rampa marina titoniano-berriasiana en la Cuenca Neuquina (Yesera del Tromen), Neuquén, Argentina. *Revista Geológica de Chile* 26: 109-123
- Spalletti, L.A., Veiga, G.A., Schwarz, E. y Franzese, J. 2008. Depósitos de flujos gravitacionales subácueos de sedimentos en el flanco activo de la Cuenca Neuquina durante el Cretácico temprano. *Revista de la Asociación Argentina* 63 (3):442-453.
- Spalletti, L., E. Schwarz y G. Veiga, 2013. Geoquímica inorgánica como indicador de procedencia y ambiente sedimentario en sucesiones de lutitas negras: los depósitos transgresivos titonianos (Formación Vaca Muerta) de la Cuenca Neuquina, Argentina. *Andean Geology*, Chile
- Stinco, L. y A. Mosquera, 2003. Estimación del contenido total de carbono orgánico a partir de registros de pozo para las formaciones Vaca Muerta y Los Molles, Cuenca Neuquina, Argentina. II Congreso de Hidrocarburos, IAPG, Buenos Aires, Argentina.
- Stinco, L.P. y Barredo, S.P., 2014. Vaca Muerta formation: An example of shale heterogeneities controlling hydrocarbon accumulations. *Unconventional Resources Technology Conference (URTEC)*.
- Stinco, L. P. y Barredo, S.P. 2016. The Argentina approach for developing unconventional gas resources. En: Quentin Grafton, Ian Cronshaw and Michal Moore (Editores). *Risks, Rewards and Regulation of Unconventional Natural Gas*. 494 pp Cambridge University Press.

- Sun, P.C., Sachsenhofer, R.F., Liu, Z.J., Strobl, S.A.I., Meng, Q.T., Liu, R. y Zhen, Z., 2013. Organic matter accumulation in the oil shale- and coal-bearing Huadian Basin (Eocene; NE China). *Int. J. Coal Geol.* 105, 1e15
- Sylwan, C., 2014. Source rock properties of the Vaca Muerta Formation, Neuquén Basin Argentina. IX Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Actas: 365-386. Mendoza.
- Tribovillard, N., Algeo, T.J., Lyons, T. y Riboulleau, A. 2006. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: an update. *Chemical Geology* 232: 12-32.
- Tuit, C., Waterbury, J. y Ravizza, G., 2004. Diel variation of molybdenum and iron in marine diazotrophic cyanobacteria. *Limnology and Oceanography* 49: 978-990.
- Tyson, R.V., 2005. The “productivity versus preservation” controversy: cause, flaws and resolution. en: Harris, N.B. (Ed.), *The Deposition of Organic-carbon-rich Sediments: Models, Mechanisms, and Consequences*, SEPM Special Publication 82, pp.
- Uliana, M.A., Biddle, K.T. y Cerdan, J., 1989. Mesozoic extension and the formation of Argentine sedimentary basins. In *Extensional tectonics and stratigraphy of the North Atlantic margins*. Tulsa, Memoir 46, pp. 599-614: American Association of Petroleum Geologists.
- Urien, C.M. y Zambrano, J.J. 1994. Petroleum Systems in the Neuquén Basin, Argentina. In (eds. Magoon L.B. and Dow W.G.) *The Petroleum System-from source to trap*. American Association of Petroleum Geologists, Memoir 60: 513-534.
- Veiga, G., Verzi, H. y Maretto, H., 2001. Modelado bidimensional en el ámbito central de la Cuenca Neuquina (Argentina). *Boletín de Informaciones petroleras*. Tercera Época 18(67): 50-63. Buenos Aires.
- Vergani, G. D., Tankard, A. J., Belotti, H. J., y Welsink, H. J., 1995, Tectonic evolution and paleogeography of the Neuquén Basin, Argentina, AAPG Memoir 62, *Petroleum Basins of South America*, p. 383-402.
- Villar, H., 2014, Informe geoquímico- Evaluación de los pozos en El Trapial, Cuenca Neuquina. Informe inédito, GeoLab Sur S.A.
- Volkheimer, W., Rauhut, O. W., Quattrocchio, M. E., and Martinez, M. A., 2008, Jurassic paleoclimates in Argentina, a review, *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, vol. 63, no. 4, p. 549-556.
- Weaver, C.E. 1931. Paleontology of the Jurassic and Cretaceous of West Central Argentina. University of Washington, Memoir 1: 1-469. Seattle.
- Yrigoyen M.R., 1991. Hydrocarbon resources of Argentina. *Petrotecnia Special Issue*, 38, p.54.



**10° CONGRESO DE
EXPLORACIÓN Y
DESARROLLO DE
HIDROCARBUROS**

**Energía y Sociedad
aliados inseparables
Mendoza 2018**