

MINERALOGÍA Y MADUREZ TERMAL DE LA FORMACIÓN LOS MONOS (DEVÓNICO), CUENCA DE TARIJA

Juan G. Veizaga-Saavedra¹, Daniel G. Poiré², Gustavo D. Vergani³, José A. Salfity⁴

1: La. Te. Andes S.A., Universidad Nacional de Salta, juangveizaga@gmail.com

2: Centro de Investigaciones Geológicas (UNLP-CONICET), Calle 1 n° 644, 1900 La Plata, Argentina,
poire@cig.museo.unlp.edu.ar

3: Pluspetrol S.A., Lima 339, 1073 Buenos Aires, Argentina, gvergani@pluspetrol.net

4: Instituto del Cenozoico (UNSa), Avda. Bolivia 5150, 4400 Salta, Argentina, salfity@usa.net

Keywords: Formación Los Monos, Madurez Termal, Índice de Vitrinita, Índice de Alteración Térmica, Índice de Arcillas

ABSTRACT

Review of methods of determination of thermal maturity: Los Monos Formation (Devonian), Tarija basin

The objective of this work is the revision of the most conventional methods used to determine the thermal maturity of the Los Monos Formation in the Tarija Basin. For this, the thermal maturity of the formation was determined from multiple vitrinite reflectance analysis, programmed pyrolysis, index of thermal alteration and clay index. Work was done on outcrop samples in the areas of Balapuca and Alarache on the border between Argentina and Bolivia, and well samples in the areas of the Ramos, Tartagal, Vespucio and Tonono hydrocarbon fields in northern Argentina, and Tacobo in the Bolivian Chaco area. The Los Monos Formation is the main source rock of the Paleozoic area of the Subandino of the north of Argentina and south of Bolivia. It is characterized by its low organic content (COT), on average less than 1%. Different divisions were postulated for this unit according to its geochemical characteristics, identifying gas generating sections and oil generating sections. The geochemical studies carried out (Tmax and IP Production Index of programmed pyrolysis) on outcrop samples as in well samples, would indicate that the formation is in the oil window. Regarding the type of kerogen, from the data of programmed pyrolysis (IH and IO), the Los Monos Formation contains type III kerogen which is primary gas generators. In contrast to the geochemical data, from the quantification of the expansive Sm layers in the argilomineral I / S it would indicate that the Los Monos Formation is in a stage of deep diagenesis (telodiagenesis) in the gas generation window. In this way, both the vitrinite reflectance and the IAT show values of maturity related to diagenesis stages lower than those provided by the method of measuring the expansive layers in the interstratified IS. Therefore, it is postulated that the method of measurement of expansive layers is more advantageous in source rocks with low organic content, as happens with the Los Monos Fm, also aligned with what was observed in the wells (presence of gas in the boreholes and in the associated reservoirs such as the Huamampampa Fm). Hence, this method contributes as an alternative to determining thermal maturity to conventional methods, especially in the case of formations with characteristics similar to the Los Monos Fm.

INTRODUCCIÓN

Las sedimentitas del Devónico aquí estudiadas forman parte del sector subandino de la Cuenca de Tarija, y se registran tanto en afloramiento como en subsuelo, junto con otras unidades estratigráficas paleozoicas, mesozoicas y terciarias en el norte de la Argentina, centro-sur de Bolivia y el Chaco paraguayo (Figura 1).

Las unidades del Silúrico y Devónico de la Argentina afloran en las Sierras Subandinas y el Sistema de Santa Bárbara y se extienden en el subsuelo del Chaco Salteño, del Chaco paraguayo y de la Cuenca Chacoparanense. Formaron parte de una cuenca sedimentaria marina de extensa distribución areal y espesas sucesiones psamo-pelíticas.

Las Sierras Subandinas, donde se ubica la localidad aquí estudiada, corresponden a una estrecha franja constituida por alineaciones orográficas meridianas y subparalelas que, separadas por valles longitudinales, representan las estribaciones más orientales de la cadena Andina en Bolivia y en el extremo norte de la Argentina. Ellas representan una verdadera “faja plegada y fallada de lámina delgada” de la parte más externa del orógeno andino entre las latitudes 18°S y 23°30’S, es decir el “Subandino Sur” de Bolivia y las Sierras Subandinas de la Argentina, ubicándose entre la Cordillera Oriental, desarrollada al oeste y la Llanura Chaqueña situada hacia el este (Starck *et al.* 2002).

La columna sedimentaria en esta región está representada por sedimentitas clásticas desde el Paleozoico Inferior hasta el Terciario. Los antecedentes estratigráficos de las unidades del Silúrico-Devónico hasta el Carbonífero Superior fueron desarrollados por Starck *et al.* (1993a, b), Sempere (1995), Starck (1995, 1999), Vistalli (1989), Suárez Soruco *et al.* (2000), Azcuy y di Pasquo (2000) y Miranda *et al.* (2000), entre otros.

Starck (1995) postuló un esquema tecto-estratigráfico del Fanerozoico para el norte de la Argentina y sur de Bolivia, en el cual el lapso Silúrico-Jurásico se divide en dos intervalos separados por una discordancia de carácter regional. Dentro del primer intervalo, Silúrico-Devónico, distinguió tres supersecuencias granocrecientes denominadas en orden estratigráfico ascendente Cinco Picachos, Las Pavas y Aguaragüe (Figura 1).

La cuenca devónica boliviano-argentina se encuentra parcialmente superpuesta en discordancia por la cuenca carbonífera superior subandina del sur de Bolivia (Grupos Macharetí y Mandiyutí) y, más al sur, por la cuenca carbonífero-pérmica del norte de la cuenca Chacoparanense (subcuenca de Alhuampa); a su vez, las sucesiones devónicas interpuestas entre ambas cuencas neopaleozoicas sirven de basamento a la cuenca cretácica del Grupo Salta y a la cuenca neógena de antepaís (Figura 2).

Sobre diferentes niveles estratigráficos del Devónico se asientan en discordancia las unidades basales de la cuenca carbonífera superior en las Sierras Subandinas, y en el subsuelo del Chaco boliviano y del norte del Chaco Salteño. Las formaciones del Carbonífero Superior de esta cuenca se reúnen en los Grupos Macharetí y Mandiyutí. En cambio, en algunos perfiles del sur de Bolivia, las formaciones Itacua y Saipurú – que representan el Fameniano-Carbonífero Inferior (Suárez

Soruco 2000)- también yacen sobre la cuenca devónica.

La sucesión estratigráfica carbonífera ha sido reinterpretada por Starck (1995) como compuesta por dos supersecuencias separadas por una discordancia, representadas en la Argentina por los Grupos Macharetí (formaciones Tupambi, Itacuamí y Tarija) y Mandiyutí (formaciones Escarpment y San Telmo). En Bolivia, el primero de estos grupos según algunos autores, incluye las formaciones Itacua y/o Saipurú, no registradas en la Argentina.

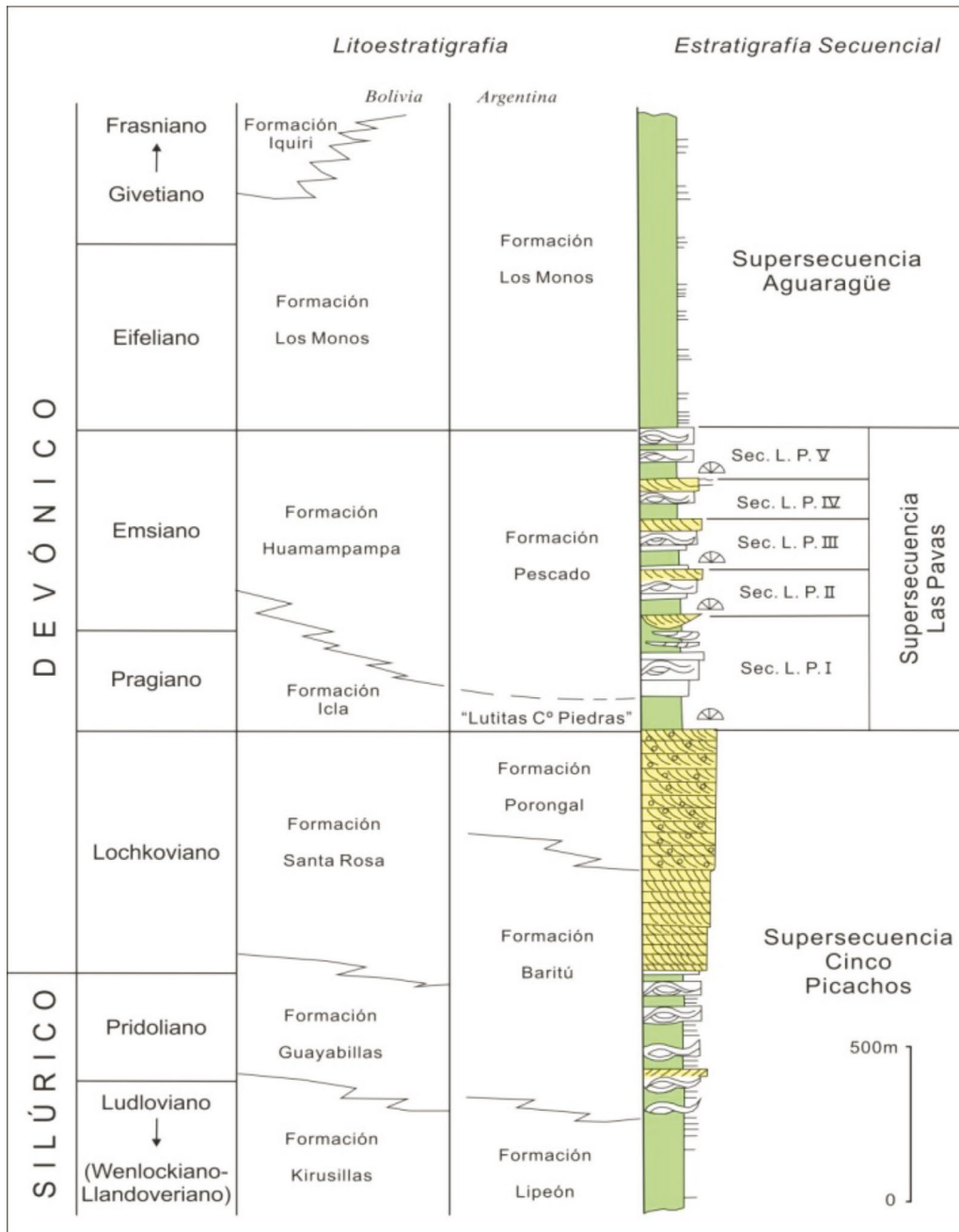


Figura 1. Sucesión estratigráfica del Silúrico-Devónico en las Sierras Subandinas de la Argentina (adaptada de Starck et al. 1993b).

Si bien los reservorios se desarrollan a distintos niveles estratigráficos (desde el Paleozoico al Terciario), las rocas madre de la cuenca se encuentran dentro de las secuencias silúrico-devónicas. Estas se corresponden con las formaciones Kirusillas, Icla y Los Monos. El estudio geoquímico de estas rocas madre potenciales ha mostrado que son de regular calidad y que la correlación de biomarcadores entre los hidrocarburos entrapados y las rocas madre potenciales apunta a que la única roca madre efectiva en la cuenca es la Formación Los Monos. El objetivo del presente trabajo es analizar la mineralogía de las arcillas de la Formación Los Monos y su maduración térmica, en el perfil de Balapuca y en algunos pozos exploratorios, a fin de contribuir a esta discusión (Figura 2).

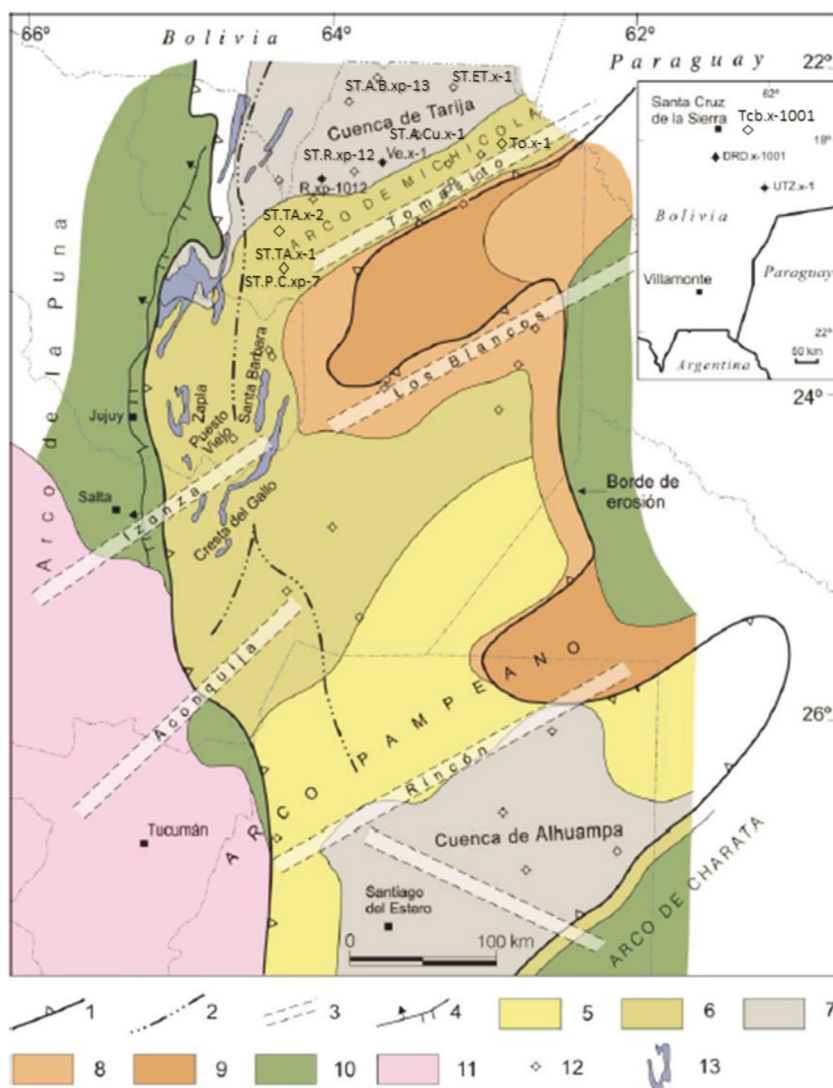


Figura 2. Cuenca silúrico-devónica del norte argentino: Cuenas superpuestas y niveles de erosión. 1 Bordes de la cuenca silúrico-devónica; 2 Eje de depocentro de la cuenca silúrico-devónica; 3 Lineamiento; 4 Falla inversa. Cuenas superpuestas: 5 Cuenca de antepaís terciaria sobre Devónico; 6 Cuenca en rift cretácico-paleógena sobre Devónico; 7 Cuenas subandina y chacoparanense del Paleozoico Superior sobre Devónico. Niveles de erosión: 8 Silúrico (Devónico totalmente erosionado); 9 Ordovícico (Devónico y Silúrico totalmente erosionados). En la Cordillera Oriental se muestran los terrenos predevónicos: 10 Cámbrico-Ordovícico; 11 Precámbrico. 12 Pozo de exploración: DRD-X1001, UTZ-X1, Ve.x-1, R.xp 1012, To.x-1, ST.R.xp-12, R.xp-1012, ST.A.B.xp-13, Tcb.x-1001, ST.ET.x-1, ST.P.C.xp-7 (I), ST.A.Cu.x-1, ST.TA.x-1 y ST.TA.x-2; 13 Afloramiento de Silúrico-Devónico (Adaptada principalmente de Mingramm y Russo 1972, Boso et al. 1983 y de otras fuentes).

ROCAS MADRE DE LA CUENCA PALEOZOICA DEL NOROESTE

Rocas madre silúricas

Las características de rocas generadoras de edad silúrica en la Argentina (Formación Kirusillas y equivalentes) son poco conocidas debido a que la unidad no es alcanzada, en condiciones normales, por las perforaciones petroleras. Los escasos datos disponibles en la literatura (Disalvo y Villar 1998, 1999) reportan estas rocas como un intervalo pelítico con contenidos orgánicos bajos a regulares (valores de Carbono Orgánico Total -COT- alrededor del 0.5% y menores; excepcionalmente por encima de 1%) y sobremadurez en el área del Chaco Salteño, caracterización análoga a la del Subandino sur boliviano (Moretti *et al.* 1994; Dunn *et al.* 1995). Aunque los tenores orgánicos originales pudieran haber sido más altos antes de la maduración y los intervalos silúricos podrían haberse comportado como generadores en el pasado, parece poco probable, por un problema de “timing”, que estos niveles hayan contribuido efectivamente a las acumulaciones de hidrocarburos de las estructuras Subandinas del norte argentino. En cambio, hacia el norte de Bolivia, en el Subandino central-Boomerang y en el Chaco Boliviano, los contenidos orgánicos de la unidad mejoran sensiblemente (Moretti *et al.* 1994), con valores registrados de COT en el rango 1-3% y máximos mayores a 5%, con querógeno de buena calidad generadora de hidrocarburos líquidos y madurez térmica de ventana de petróleo. De acuerdo con información publicada por Lafitte *et al.* (1998), los petróleos acumulados en el área de Boomerang reconocen una vinculación genética con la roca madre El Carmen (equivalente de Fm Kirusillas).

Las rocas madre de la cuenca se encuentran dentro de las secuencias silúrico-devónicas. En ellas, cada una de las porciones basales de las supersecuencias descriptas es susceptible de ser considerada como una roca madre potencial. Corresponden a las formaciones Kirusillas, Icla y Los Monos, que se caracterizan por estar constituidas por facies distales de plataforma. El estudio geoquímico de estas rocas madre potenciales (Disalvo y Villar 1998) ha mostrado que son de regular calidad debido a los pobres contenidos de materia orgánica. Por otro lado, la correlación de biomarcadores entre los hidrocarburos entrampados y las rocas madre potenciales apunta a que la única roca madre efectiva en la cuenca es la Formación Los Monos.

Formación Los Monos

La Formación Los Monos alcanza aproximadamente 700 a 1000 m de espesor y se encuentra constituida mayoritariamente por pelitas oscuras, con delgadas intercalaciones de areniscas muy finas. Desde el punto de vista geoquímico la Formación Los Monos presenta tenores de COT del orden del 1% y potencial generador de hidrocarburos (S1+S2) entre 2 y 3 mg HC/g Roca en promedio. Estos, si bien son bajos, se compensan con el abultado espesor de la unidad. Además,

brinda un alto Source Potencial Index(SPI) de poco más de 4 tHC/m² (toneladas de hidrocarburos por metro cuadrado); valores similares son mencionados por Disalvo y Villar (1998) para la zona del Chaco Salteño, mientras que en Bolivia se mencionan valores mayores (5 tHC/m², Moretti 1997).

El querógeno de la unidad prácticamente carece de estructura, y es de Tipo II/III a Tipo III/IV de acuerdo a análisis por el método de Rock-Eval. Estos querógenos tenderían a generar principalmente gas. Disalvo y Villar (1998) postulan una división de la Formación Los Monos de acuerdo a sus características geoquímicas. Reconocen una sección superior, con predominio de querógenos de Tipo II/III de origen mixto marino-continental y generadores de gas y petróleo; y una sección inferior con mayor contenido de querógeno amorfo, marino, mal preservado (Tipo III/IV), probablemente generador de gas. Otros estudios realizados (Cerqueira y Schulz 1998; di Pasquo 2007) indican distribuciones distintas. Parte de estas diferencias se deberían a una alternancia de niveles con distintos contenidos de distintos tipos de querógenos, que originan las anomalías de distribución por muestreos no muy densos.

Una característica general de la unidad es su tendencia a generar hidrocarburos livianos (petróleo liviano, condensado, gas) debido a la dilución del querógeno (marino amorfo-algal con variable contribución terrestre) en la roca (bajo COT%) y a su calidad regular (valores de Índice de Hidrógeno - IH - promedio estimados en no mayores de 400 mg HC/g COT). Ello origina un déficit en el proceso de expulsión, retención de los hidrocarburos generados en la roca madre y un craqueo continuo hacia compuestos cada vez más livianos. Razones análogas son invocadas por Moretti *et al.* (1996) y Moretti (1997) para explicar los altos valores de Gas/Oil Ratio (GOR) del Subandino sur de Bolivia.

Debido al limitado contenido de materia orgánica y al carácter parcialmente refractario del querógeno, se cree que la etapa de expulsión de hidrocarburos comienza a niveles relativamente altos de stress térmico, a una Reflectancia de la Vitrinita Equivalente (RVE) mayor a 0.9-1.0%, con predominio de hidrocarburos gaseosos.

Los estudios realizados en la Formación Los Monos consideran que en general sus características geoquímicas se mantienen más o menos constantes a lo largo de toda la cuenca, lo que combinado con la distribución homogénea de espesores, facies y de madurez, asegura la disponibilidad de roca madre prácticamente en toda la cuenca. Esta situación no rige en posiciones más occidentales de la cuenca (Sierras Subandinas Occidentales), donde la disminución de los espesores de la Formación Los Monos reduce la disponibilidad volumétrica de roca generadora.

METODOLOGÍA

Microscopía Electrónica de Barrido

Se analizaron 100 muestras correspondientes a la sección inferior, media y superior de la Formación Los Monos, en función de la disponibilidad de material para su estudio. Las mismas

proceden de los pozos mencionados anteriormente y en el sector: “Resultados”.

Se hizo junto a la Difracción de Rayos X, para definir argilofacies, y para obtener un modelo más robusto de la mineralogía de la fracción fina de la Fm. Los Monos, para luego evaluar cómo impactan las argilofacies definidas en la geomecánica de la roca.

Esta metodología permitió definir la textura de la fracción fina reconociendo la naturaleza detrítica o diagenética de los argilominerales y su forma de intercalarse en la roca: dispersa, laminada o estructural para luego evaluar el impacto de la textura en la geomecánica y en la porosidad.

Tipología de arcillas

Texturalmente, las arcillas pueden intercalarse de tres formas (esta clasificación se usa para arenaspero fue adaptada para pelitas) (Neasham, 1977; Visser, 1988; Sams y Andrea, 2001):

La arcilla dispersa es la más perjudicial desde el punto de vista de la pérdida de porosidad, ya que rellena parcialmente los poros y obstruye las gargantas porales. La arcilla laminada no produce pérdida de porosidad sin embargo puede actuar como barrera de permeabilidad si su distribución es muy extendida y continua. La arcilla estructural no tiene ningún efecto sobre la porosidad ya que está presente como granos.

Difracción de Rayos X

A partir del análisis de difracción de rayos X se pueden definir tres grupos de minerales: cuarzo, carbonatos y arcillas. El grupo del cuarzo incluye cuarzo, feldspatos y pirita. El grupo del carbonato incluye calcita, dolomita y siderita. El grupo de la arcilla incluye todas las arcillas.

La técnica de roca total consiste en el análisis por difracción de rayos X de una muestra representativa del total de la roca, que se obtiene moliendo un trozo de roca hasta alcanzar la malla 230 ASTM. El polvillo obtenido se coloca en un portamuestras de aluminio y se compacta uniformemente hasta que adquiera una superficie lisa y regular para ser expuesta a los rayos X. De esta manera se identifican todos aquellos componentes minerales de una roca que se encuentren en una proporción mayor al 3 %.

Los análisis de muestra orientada para arcillas se realizan sobre el polvillo obtenido, pero llevándolo previamente a suspensión en agua destilada. Luego se somete el preparado en un vibrador ultrasónico durante 5 minutos, para que el material muy fino (menor de 4 micrones) quede en suspensión. Después de un tiempo determinado y de acuerdo a la ley de Stokes, se extrae la muestra con pipeta de la sección subsuperficial de la suspensión y se la lleva a un portaobjetos para su secado a temperatura de laboratorio. De esta manera los argilominerales se sedimentan

lentamente sobre el portaobjeto y adquieren una orientación preferencial según el plano (001). Esta muestra es denominada natural.

Para realizar la identificación y cuantificación de las arcillas, también se realizan dos ensayos más sobre muestras denominadas glicolada y calcinada. La primera se obtiene exponiendo el preparado natural a los vapores de etilenglicol durante veinticuatro horas. La calcinada se logra colocando el preparado natural en estufa, a 550 grados centígrados durante dos horas.

Una vez interpretados los difractogramas y reconocidos los minerales presentes en cada muestra según normas y procedimientos internacionales y patrones propios, se realiza su análisis semi-cuantitativo y se vuelcan los resultados en las tablas composicionales correspondientes. Con estos datos se grafica la distribución en cada pozo y/o afloramiento de los minerales de la roca total y la de los argilominerales.

Por otra parte, con el objeto de establecer grados diagenéticos a partir de argilominerales y su relación con la maduración de la materia orgánica y ventana de petróleo, se mide la cantidad de capas expansivas en el interestratificado Illita/Esmectita (IS), en las muestras en que el pico correspondiente al interestratificados I/S tiene buena cristalinidad, según los criterios de Powel *et al.* (1978). Según estos autores el porcentaje de capas expansivas se puede calcular directamente utilizando el valor del pico 001 en la muestra natural (Tabla 1). Con los valores mencionados y teniendo en cuenta el criterio de Foscolos *et al.* (1976) se ubican las muestras dentro de las ventanas de maduración de los hidrocarburos, los que se expresarán más adelante.

Powel <i>et al.</i> , 1978	
Pico I/S (muestra natural)	% Capas expansivas
10,25 - 10,45	20 - 30
10,45 - 10,90	30 - 40
10,90 - 11,10	40 - 50
11,10 - 11,40	50 - 60
11,40 - 11,80	60 - 70
11,80 - 12,26	70 - 80

Tabla 1. Cálculo de porcentaje de capas expansivas en los interestratificados IS según la metodología de Powel *et al.* (1978).

RESULTADOS

Se describieron un total de 10 coronas correspondientes a la sección inferior, media y superior de la Formación Los Monos, en función de la disponibilidad de material para su estudio. Las mismas proceden de los pozos Ve.x-1 (Vespucio.x-1), To.x-1 (Tonono.x-1), ST.R.xp-12 (Ramos.xp-12), R.xp-1012 (Ramos.xp-1012) ST.A.B.xp-13 (Aguas Blancas.xp-13), Tcb.x-1001 (Tacobo.x-1001), ST.ET.x-1 (El Tunal.x-1) (Fm Cachipunco? Devónico?), ST.P.C.xp-7 (I) (Peña Colorada.xp-7 (I)), ST.A.Cu.x-1 (Anticlinal Cuchuma.x-1) (Fm Cachipunco? Devónico?), ST.TA.x-1 (Tartagal.x-1) y ST.TA.x-2 (Tartagal.x-2).

SEDIMENTOLOGÍA

En la mayoría de las coronas están presentes las siguientes facies (Figs. 3, 8, 11 y 13):

- ⇒ Heterolita con estratificación mixta ondulosa (Hto)
- ⇒ Heterolita pelítica con estratificación mixta lentiforme (pequeñas lentes de areniscas finas) (Htpw)
- ⇒ Heterolita arenosa con estratificación mixta flaser (Htaf): se observa bioturbación y briznas vegetales.
- ⇒ Heterolita arenosa con estratificación flaser, presenta laminación entrecruzada, intercala una lámina de arenisca y una de pelita (Htaf)
- ⇒ Arenisca con posible acción microbiana (Smi)
- ⇒ Arenisca masiva rojizas.
- ⇒ Pelitas masivas, bioturbadas.
- ⇒ Arenisca masiva (Sm), bioturbada.

MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO

El pozo Vespucio x-1 (Fig. 4) posee illitas con bordes irregulares y fragmentados, es decir, arcillas de origen detrítico. Desde el punto de vista textural es arcilla laminada, es decir, no produce pérdida de porosidad, tampoco se observa una distribución extendida y continua por lo que no actuaría como barrera de permeabilidad.

El pozo Ramos xp-1012 (Fig. 5) posee illitas/esmectitas con bordes irregulares, es decir, arcillas de origen detrítico. Desde el punto de vista textural es arcilla laminada, es decir, no produce pérdida de porosidad, tampoco se observa una distribución extendida y continua por lo que no actuaría como barrera de permeabilidad. También se observan arcillas dispersas, las más perjudiciales desde el punto de vista de la pérdida de porosidad, ya que rellena parcialmente los poros y obstruye las gargantas porales.

El pozo Ramos xp-12 (Fig. 6) posee arcillas laminadas y se observa una distribución extendida y continua por lo que actuaría como barrera de permeabilidad. Sin embargo también se observa desarrollo de microporosidad.

El pozo Tacobo x-1001 (Fig. 7) posee illitas/esmectitas con bordes irregulares, es decir, arcillas de origen detrítico. Desde el punto de vista textural es arcilla laminada, es decir, no produce pérdida de porosidad, tampoco se observa una distribución extendida y continua por lo que no actuaría como barrera de permeabilidad.

El pozo Tonono x-1 (Fig. 9) posee illitas con bordes irregulares y fragmentados, es decir, arcillas de origen detrítico como así también illitas con bordes regulares y definidos, es decir,

arcillas de origen diagenético. Desde el punto de vista textural es arcilla laminada, es decir, no produce pérdida de porosidad, tampoco se observa una distribución extendida y continua por lo que no actuaría como barrera de permeabilidad.

En el pozo El Tunal x-1 (Fig. 10) se observa crecimiento autigénico de fibras de illita, con bordes regulares y definidos, es decir, arcillas de origen diagenético. Desde el punto de vista textural es arcilla estructural, es decir, no tiene ningún efecto sobre la porosidad ya que está presente como granos. También se observa I/S detríticas y laminadas.

El pozo Peña Colorada xp-7 (Fig. 12) posee illitas con bordes irregulares y fragmentados, es decir, arcillas de origen detrítico. Desde el punto de vista textural es arcilla laminada, es decir, no produce pérdida de porosidad, tampoco se observa una distribución extendida y continua por lo que no actuaría como barrera de permeabilidad. Sin embargo también se observa desarrollo de microporosidad.

El pozo Aguas Blancas xp-13 (Fig. 14) posee illitas con bordes irregulares y fragmentados, es decir, arcillas de origen detrítico. Desde el punto de vista textural es arcilla estructural, es decir, no tiene ningún efecto sobre la porosidad ya que está presente como granos. También se observa I/S detríticas y laminadas.

En el pozo Anticlinal Cuchuma x-1 (Fig. 15) se observa cloritas autigénicas en apilamiento de láminas orientadas, con bordes regulares y definidos, es decir, arcillas de origen diagenético. Desde el punto de vista textural es arcilla laminada.

En el afloramiento Balapuca (Fig. 16) se observan illitas, con bordes irregulares y fragmentados, es decir, arcillas de origen detrítico. Desde el punto de vista textural es arcilla laminada.

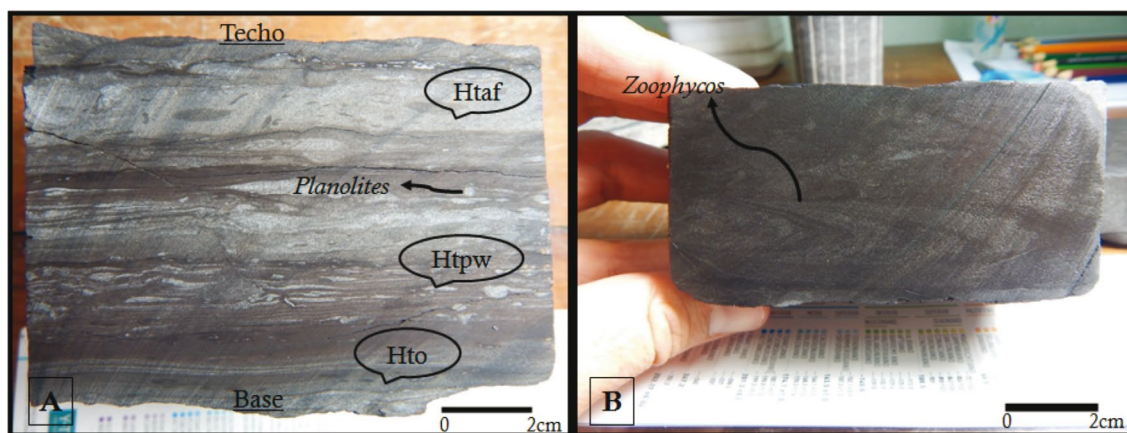


Figura 3. Pozo Vespucio x-1. A. Intercalación de Heterolitas con estratificación mixta ondulosa (Hto), Heterolitas pelíticas con estratificación mixta lentiforme (pequeñas lentes de areniscas finas) (Htpw) y Heterolitas arenosas con estratificación mixta flaser (Htaf). Se observa bioturbación y briznas vegetales. Algunos niveles rojizos. B. Pelitas masivas, bioturbada.

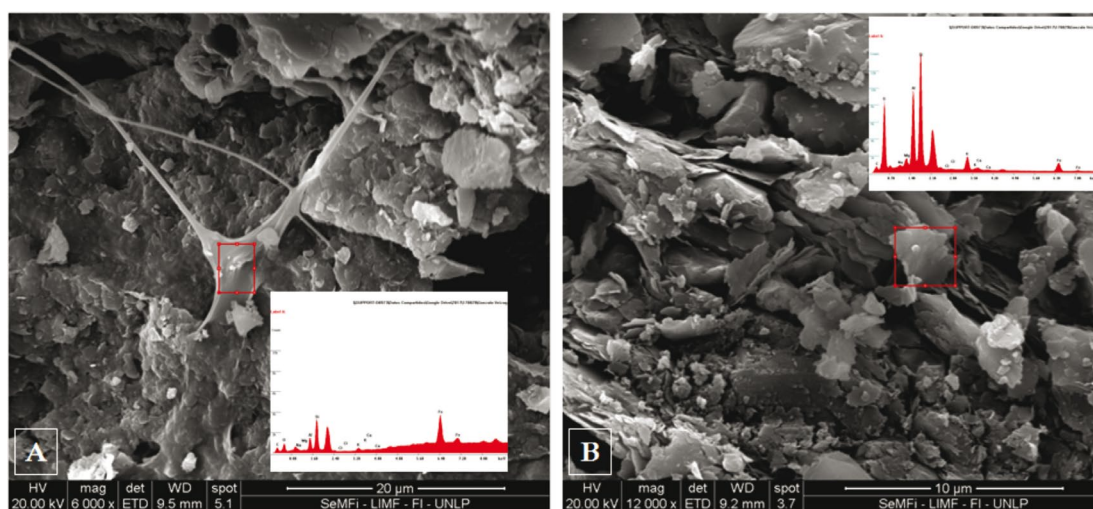


Figura 4. Pozo Vespucio x-1. A. Materia orgánica. B. Illitas con bordes irregulares y fragmentados. Arcilla laminada.

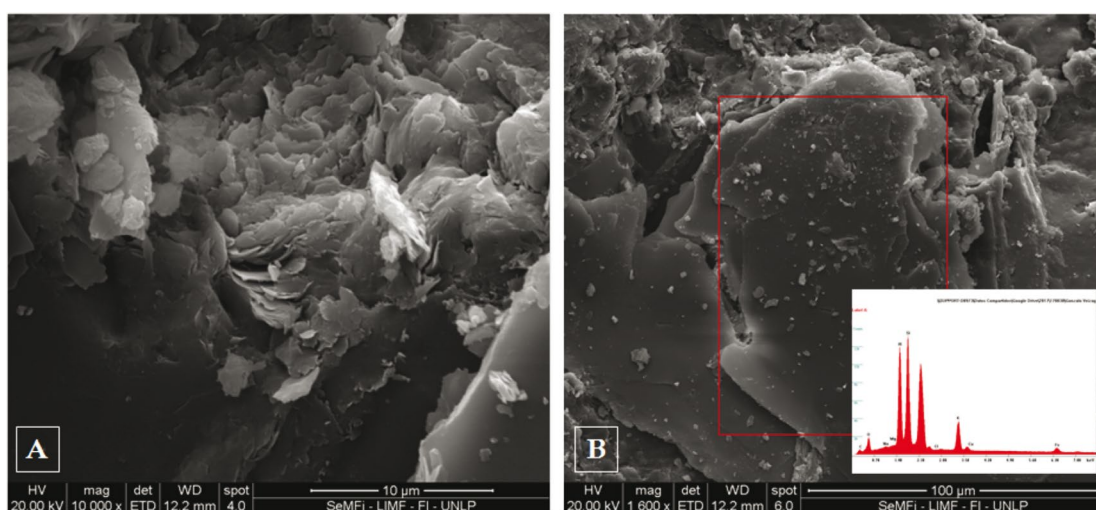


Figura 5. Pozo Ramos xp-1012. A. Illita/Esmectita con bordes irregulares. Arcilla dispersa. B. Illita/Esmectita con bordes irregulares. Arcilla laminada.

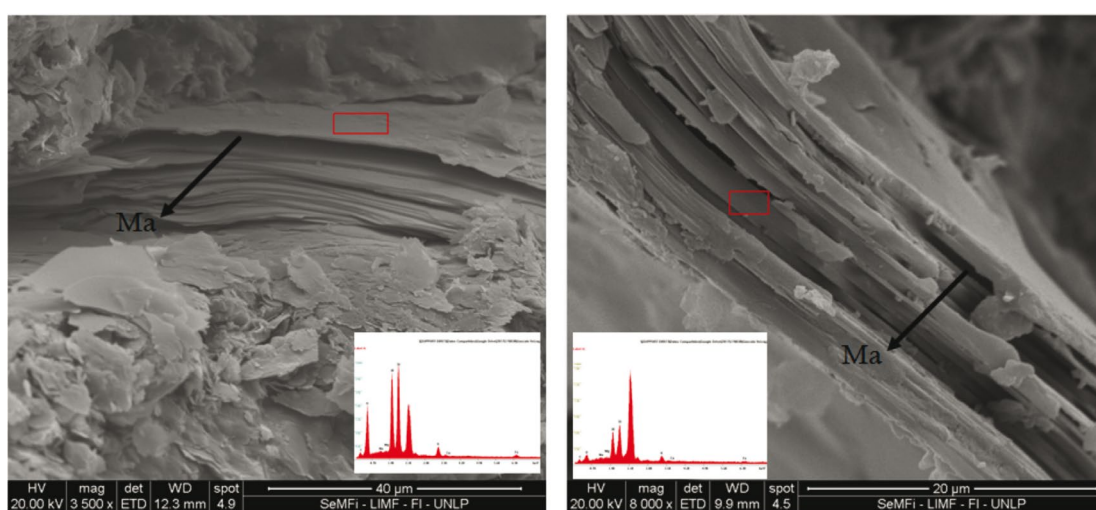


Figura 6. Pozo Ramos xp-12. Se visualizan minerales arcillosos orientados de forma subparalela (Ar) con desarrollo de microporosidad (Ma). Arcilla laminada.

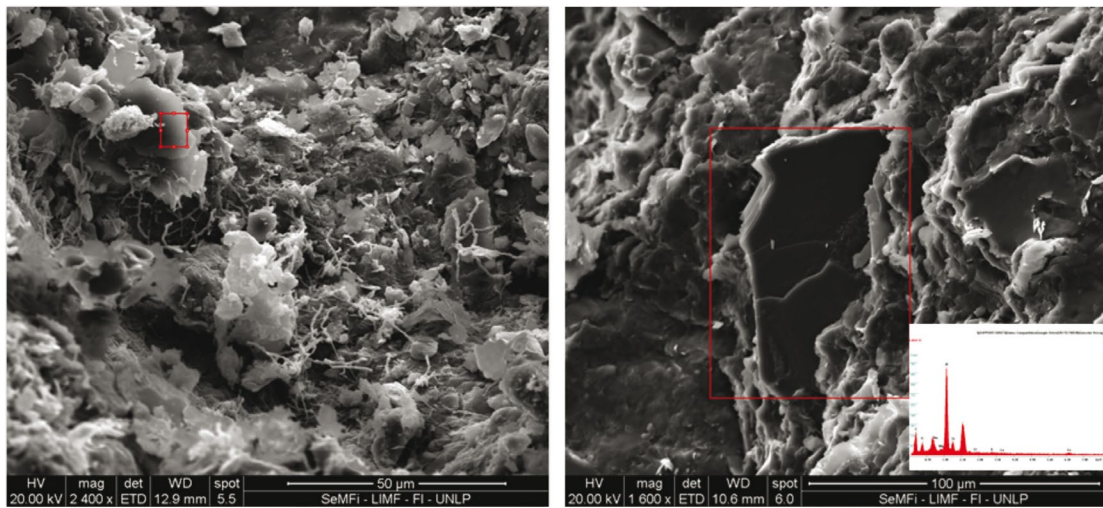


Figura 7. Pozo Tacobo x-1001. Illita/Esmectita con bordes irregulares. Arcilla laminada.

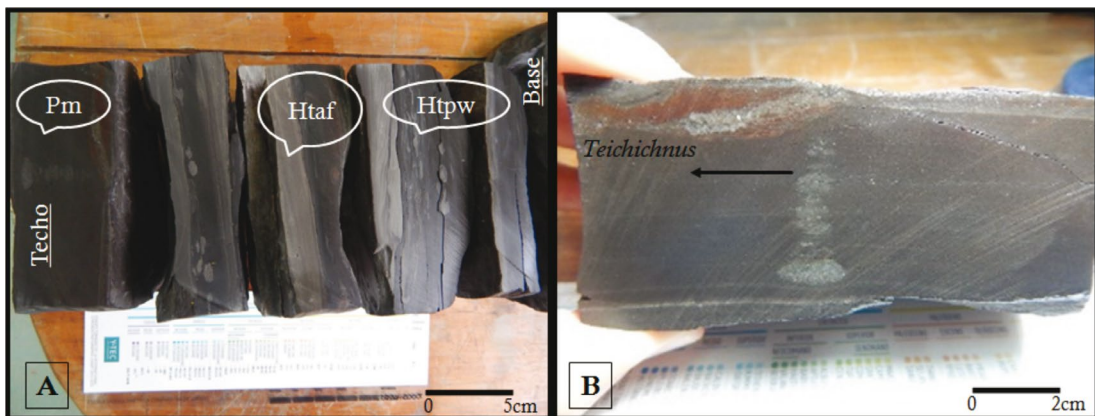


Figura 8. Pozo Tonono x-1. A. Intercalación de Heterolitas pelíticas con estratificación mixta lentiforme (pequeñas lentes de areniscas finas) (Htpw), Heterolitas arenosas con estratificación mixta flaser (Htaf) y Pelitas masivas (Pm). B. Pelitas masivas, bioturbada.

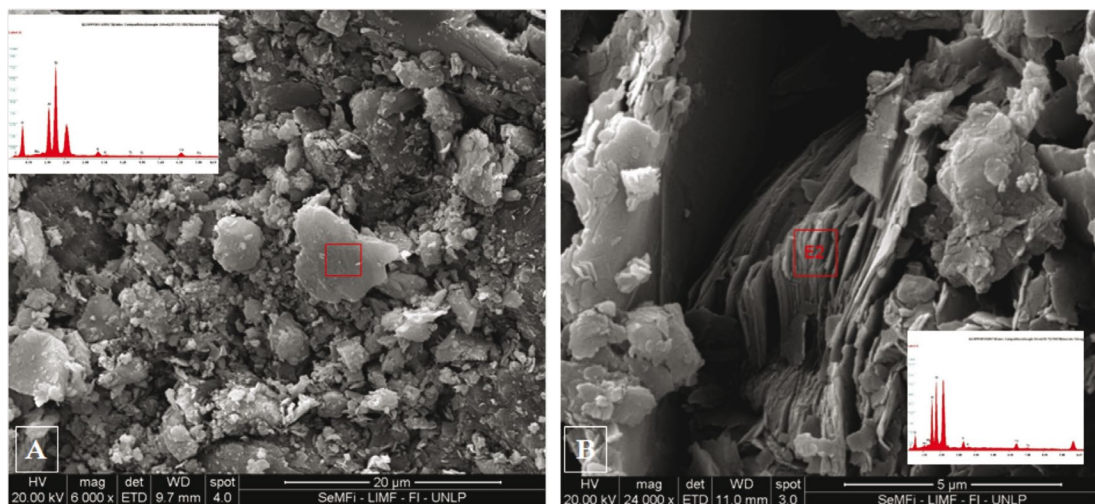


Figura 9. Pozo Tonono x-1. A. Illitas con bordes irregulares y fragmentados. B. Illitas con bordes regulares y definidos. Arcilla laminada.

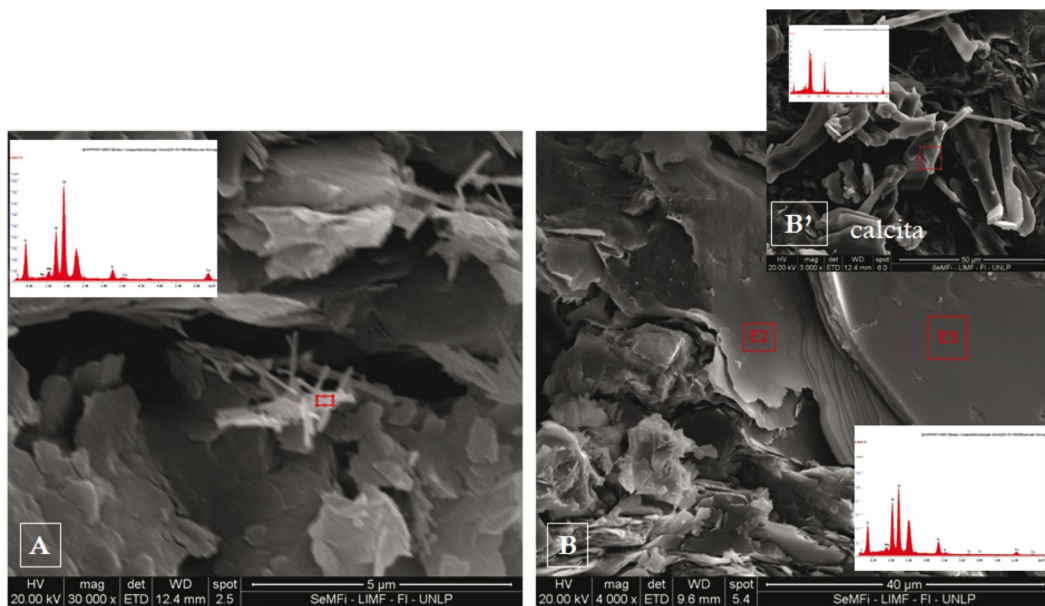


Figura 10. Pozo El Tunal x-1. A. Crecimiento autigénico de fibras de illita. Arcilla estructural. B. I/S con bordes irregulares. Arcilla laminada. B'. Calcita.



Figura 11. Pozo Peña Colorada xp-7. A. Heterolita arenosa, hacia la base nivel arenoso-pelítico deformado. B. Nivel deformado. C. Pelita masiva con Rhizocorallium.

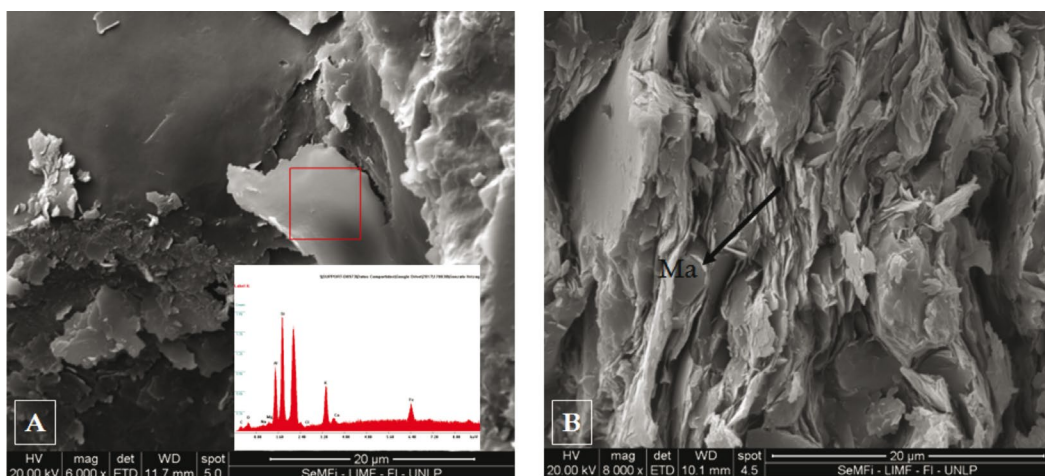


Figura 12. Pozo Peña Colorada xp-7. A. Illitas con bordes irregulares y fragmentados. B. Illitas con bordes irregulares y fragmentados con desarrollo de microporosidad (Ma). Arcilla laminada.



Figura 13. Pozo Aguas Blancas xp-13. A. Intercalación de Pelitas masivas, Heterolitas pelíticas con estratificación mixta lentiforme y Heterolitas arenosas con estratificación mixta flaser. Hacia la base Areniscas masivas. Se observa bioturbación y briznas vegetales.

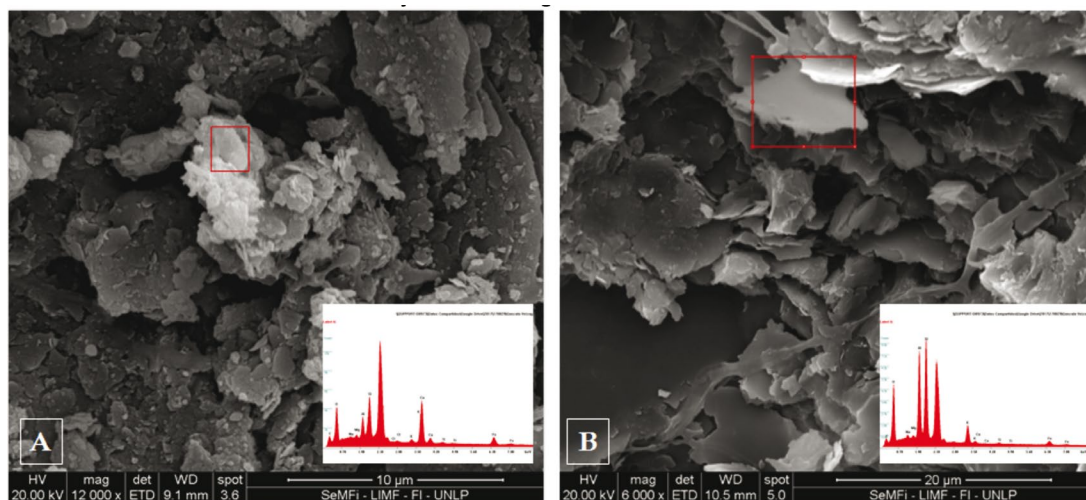


Figura 14. Pozo Aguas Blancas xp-13. A. Illita detríticas con bordes irregulares y fragmentados. Arcilla estructural. B. Interestratificado I/S con bordes irregulares y fragmentados. Arcilla laminada.

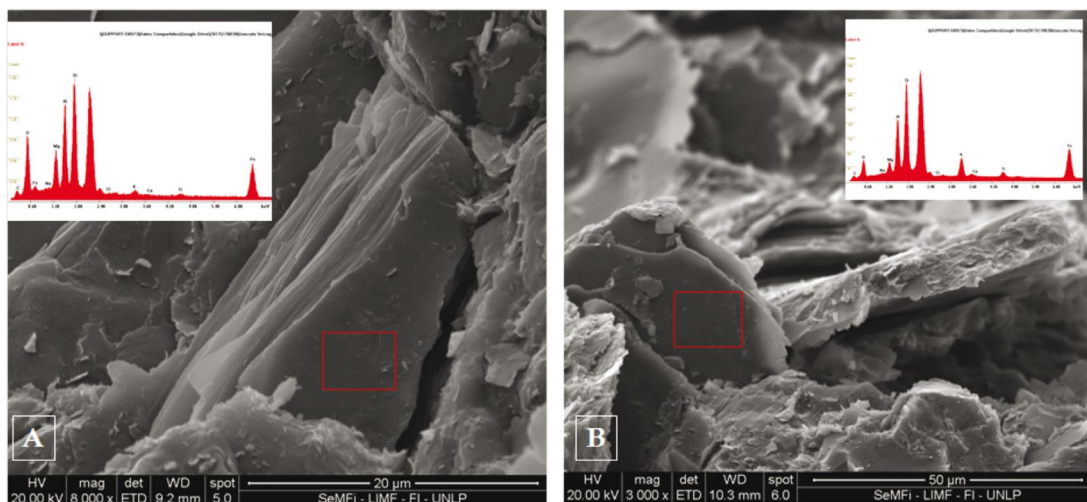


Figura 15. Pozo Anticlinal Cuchuma x-1. A. Cloritas autígenicas en apilamiento de láminas orientadas. Arcilla laminada. B. Illita?o clorita con bordes irregulares? ricas en Fe.

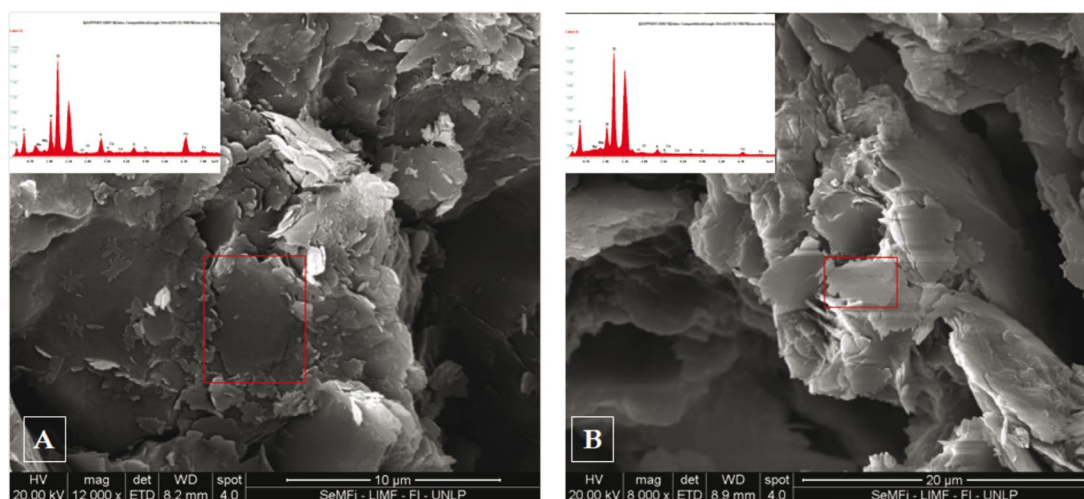


Figura 16. Afloramiento Balapuca. A. Illita con bordes irregulares y fragmentados. Arcilla laminada. B. Illita con bordes irregulares y fragmentados. Arcilla laminada.

MINERALOGÍA DE LA FM LOS MONOS

En el perfil de afloramiento Balapuca (Fig. 17) se observa que la Fm. Los Monos presenta en promedio cuarzo (65%) plagioclasa (10%) y arcillas (25%). En cuanto a la mineralogía de la fracción arcilla se caracteriza por la presencia en promedio de illita (45%), illita/esmectita (20%), clorita (25) y caolinita (10%).

En el pozo Ramos.xp-1012 (Fig. 18) se observa que la Fm. Los Monos presenta en promedio cuarzo (75%) plagioclasa (10%) y arcillas (15%). En cuanto a la mineralogía de la fracción arcilla se caracteriza por la presencia en promedio de illita (50%), illita/esmectita (20%), clorita (25) y caolinita (5%).

En el pozo Tacobo.x-1001 (Fig. 19) se observa que la Fm. Los Monos presenta en promedio cuarzo (70%) plagioclasa (5%), calcita (5%) y arcillas (20%). En cuanto a la mineralogía de la fracción arcilla se caracteriza por la presencia en promedio de illita (45%), illita/esmectita (15%), clorita (15) y caolinita (25%)

A partir del análisis mineralógico por difracción de rayos X es posible definir que la Fm Los Monos en todos los pozos estudiados y en el perfil de afloramiento presenta una mineralogía de la roca total promedio, compuesta principalmente por cuarzo (70%), plagioclasa (10%) y arcillas (20%). En cuanto a la mineralogía de la fracción arcilla se caracteriza por la presencia en promedio de illita (45%), illita/esmectita (20%), clorita (25) y caolinita (10%) (Fig. 20). Si bien se observa que hacia el pozo Tcb.x-1001 aumenta el contenido de carbonatos y la presencia de clorita.

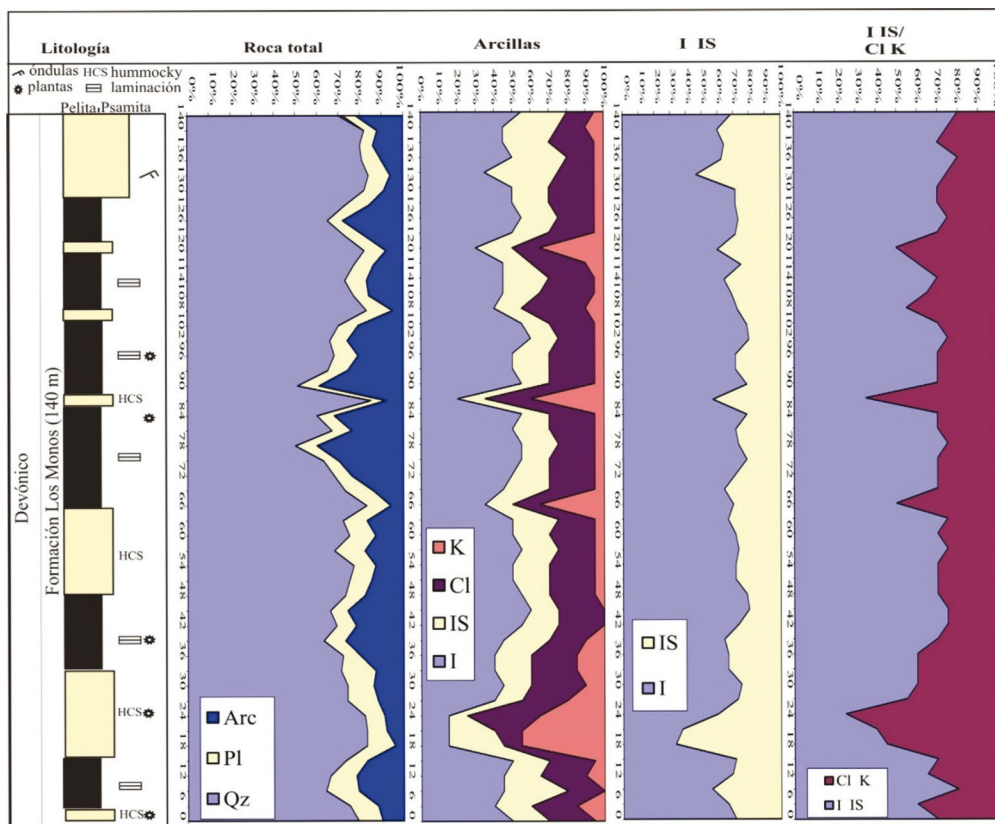


Figura 17. A. Perfil mineralógico roca total y fracción arcilla de la Fm Los Monos en el afloramiento Balapuca (Arc, arcilla; Pl, plagioclasa; Qz, cuarzo; K, caolinita; Cl, clorita; IS, illita/esmectita; I, illita).

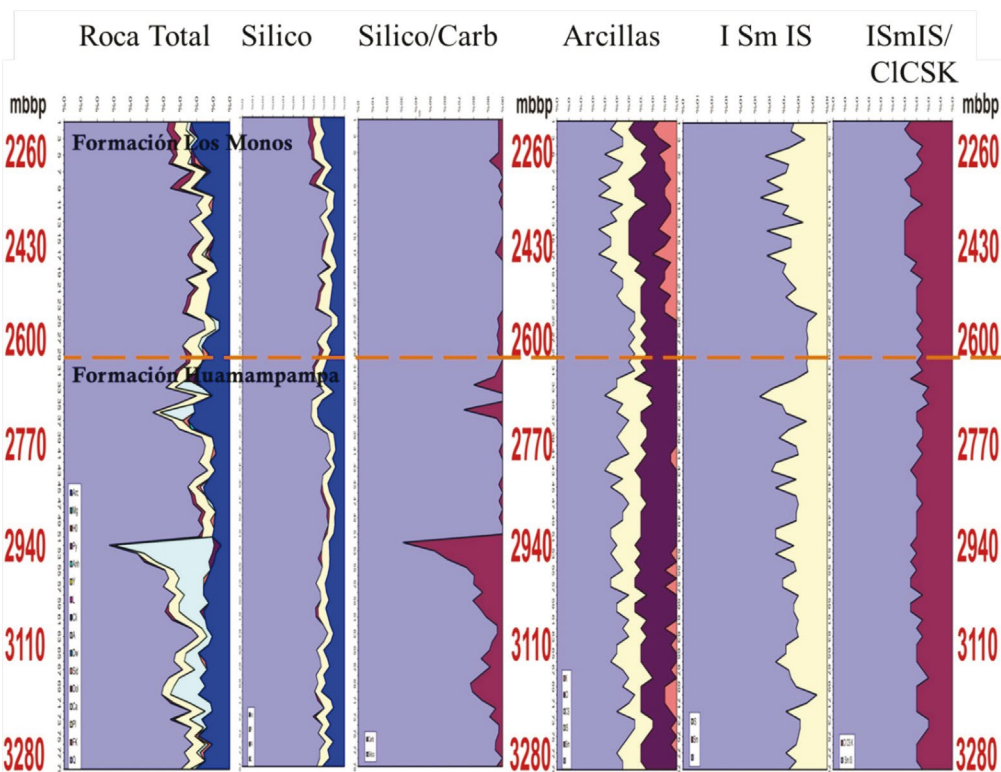


Figura 18. A. Perfil mineralógico roca total y fracción arcilla de la Fm Los Monos en el pozo Ramos xp-1012.

En el afloramiento Balapuca se observan illitas e I/S predominantemente, detríticas y laminadas. En el pozo Ramos x-1012 se observan illitas e I/S predominantemente, detríticas, laminadas y dispersas. En el pozo Tacobo x-1001 se observan illitas e I/S predominantemente, detríticas y laminadas.

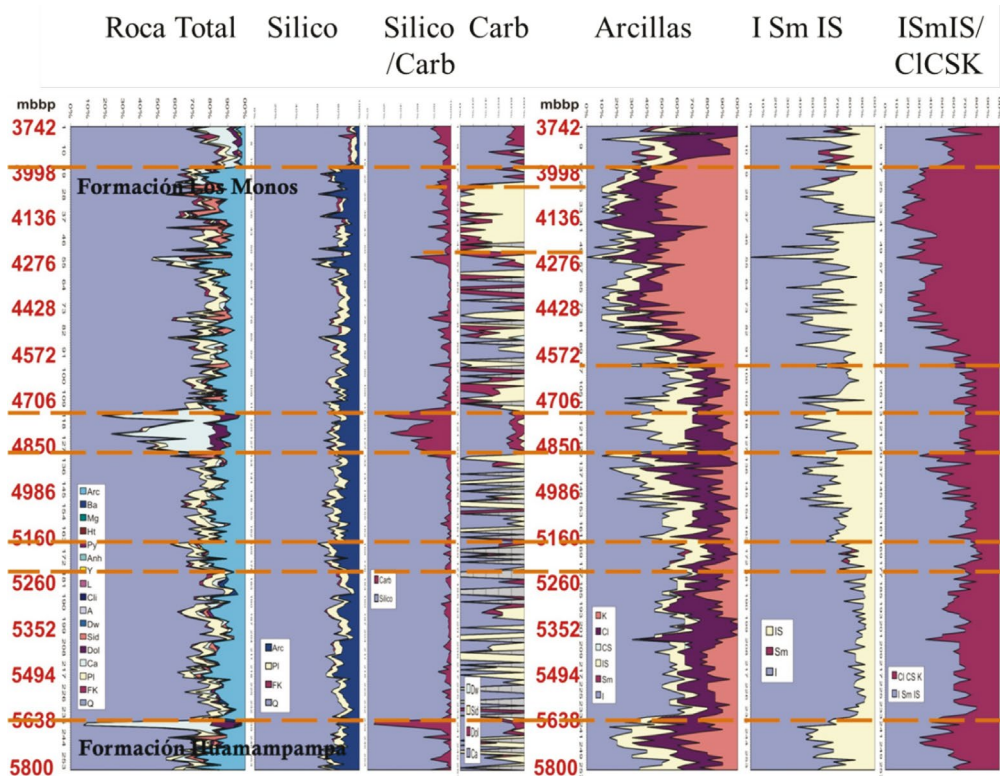


Figura 19. A. Perfil mineralógico roca total y fracción arcilla de la Fm Los Monos en el pozo Tacobo x-1001.

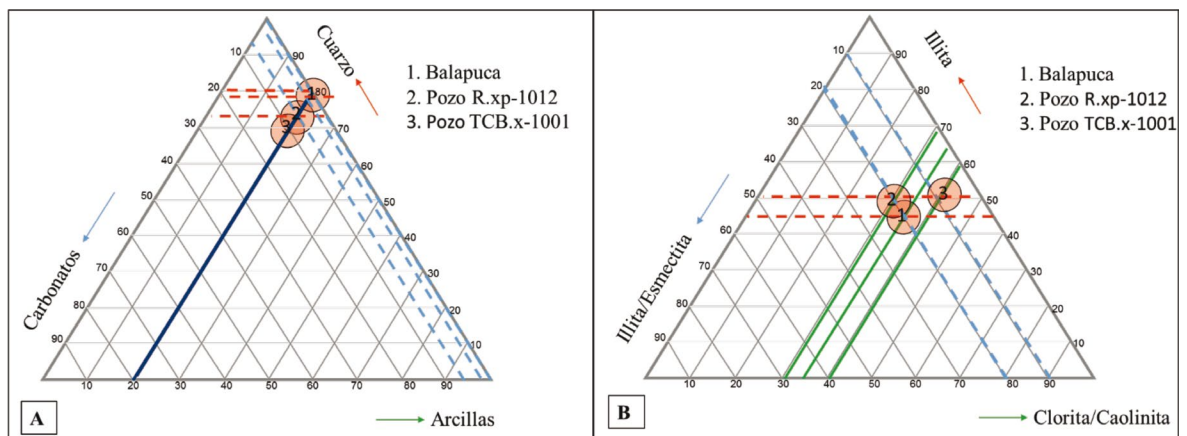


Figura 20. A. Comparación mineralógica roca total de la Fm. Los Monos. B. Comparación mineralógica fracción arcilla de la Fm. Los Monos.

GEOQUÍMICA

En el pozo Ramos.xp-1012, la relación S2/S3 y los parámetros de madurez del querógeno (Tmax, TAI y %Ro) indican que la Fm. Los Monos se encuentra en ventana de generación de petróleo (Hernández *et al.* 2011).

En el pozo Vespucio.x-1, el COT es regular de 0.5 a 1%, el Tmax, %Ro (0.5 a 1), TAI indican ventana de petróleo. Potencial de generación pobre a moderado. En el pozo Ustarez.x-1 el COT es regular de 0.5 a 1%, S2/S3, IH indican ventana de generación mixta a petróleo, Tmax, %Ro y TAI indican ventana de petróleo. Potencial de generación pobre (Cruz *et al.* 2002).

En el pozo Dorado.x-1 el COT es moderado a alto de 1.0 a 1.5%, Tmax, %Ro y TAI indican ventana de petróleo. Potencial de generación pobre a moderado. En el pozo Tacobo.x-1001 el COT es moderado de 1.5%, a partir de %Ro se observa que Los Monos Superior es inmaduro (0.58) y Los Monos Inferior está en ventana de petróleo (0.8) mientras que la Fm. Icla en el mismo pozo en la de gas (María *et al.* 2013).

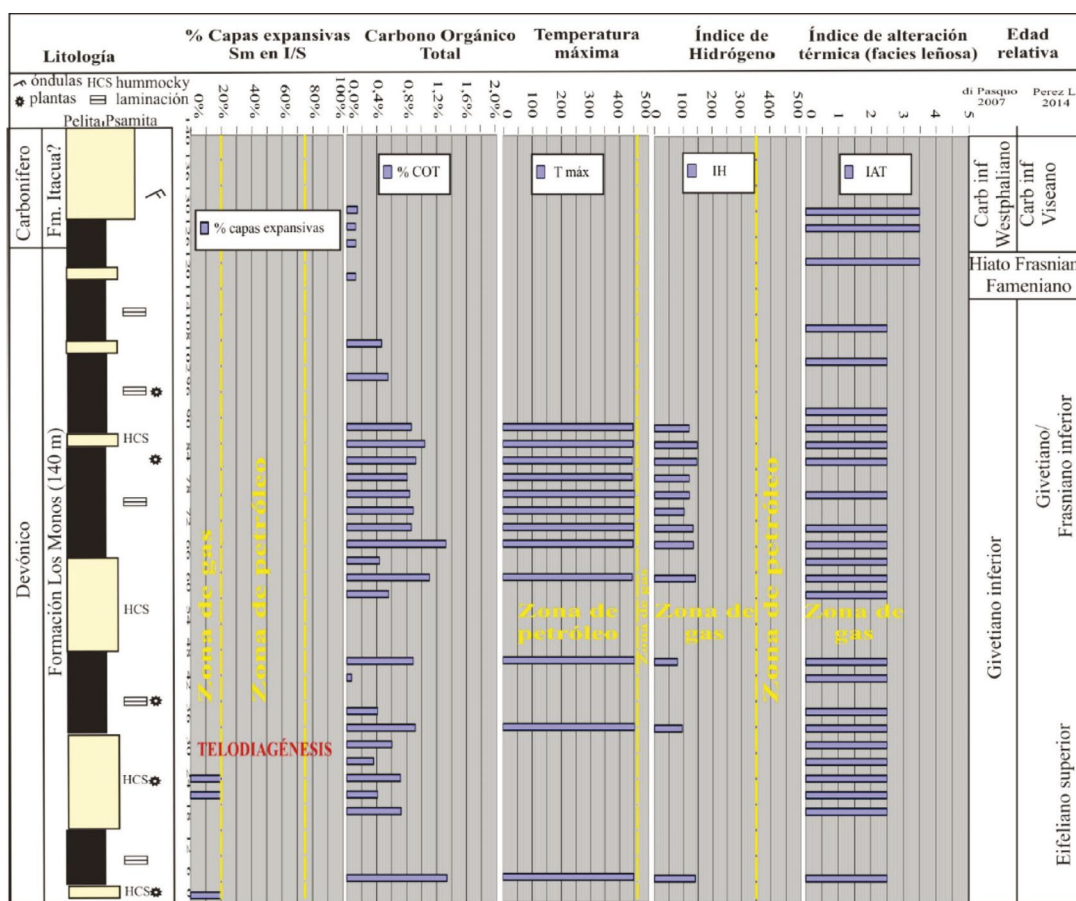


Figura 21. A. Perfil de madurez termal de la Fm. Los Monos en el afloramiento Balapuca.

POTENCIAL OLEOGENÉTICO DE LA FM LOS MONOS

Según el estudio geoquímico realizado de la Fm. Los Monos en muestras de afloramiento de la localidad de Balapuca (Fig. 21), estaría en ventana de petróleo según la estimación de la madurez térmica a partir de los datos de Tmax e Índice de Producción (IP) de la pirólisis programada. Si bien el tipo de materia orgánica predominante (principalmente leñosa) es generadora de gas. En cuanto al tipo de querógeno a partir de los datos de pirólisis programada (IH e IO), la Formación Los Monos posee querógeno tipo III los cuales son generadores primarios de gas.

La cuantificación de las capas expansivas Sm en los argilominerales I/S (Foscolos *et al.* 1976) indicaría que la Formación Los Monos se encuentra en una etapa de diagénesis profunda (telodiagénesis) en ventana de generación de gas (Fig. 21).

En el pozo Tacobo x-1001, el índice de arcillas indicaría etapa final de la ventana de petróleo (inicio de gas) mientras que los valores de reflectancia de vitrinita indicarían ventana de petróleo (Fig. 22).

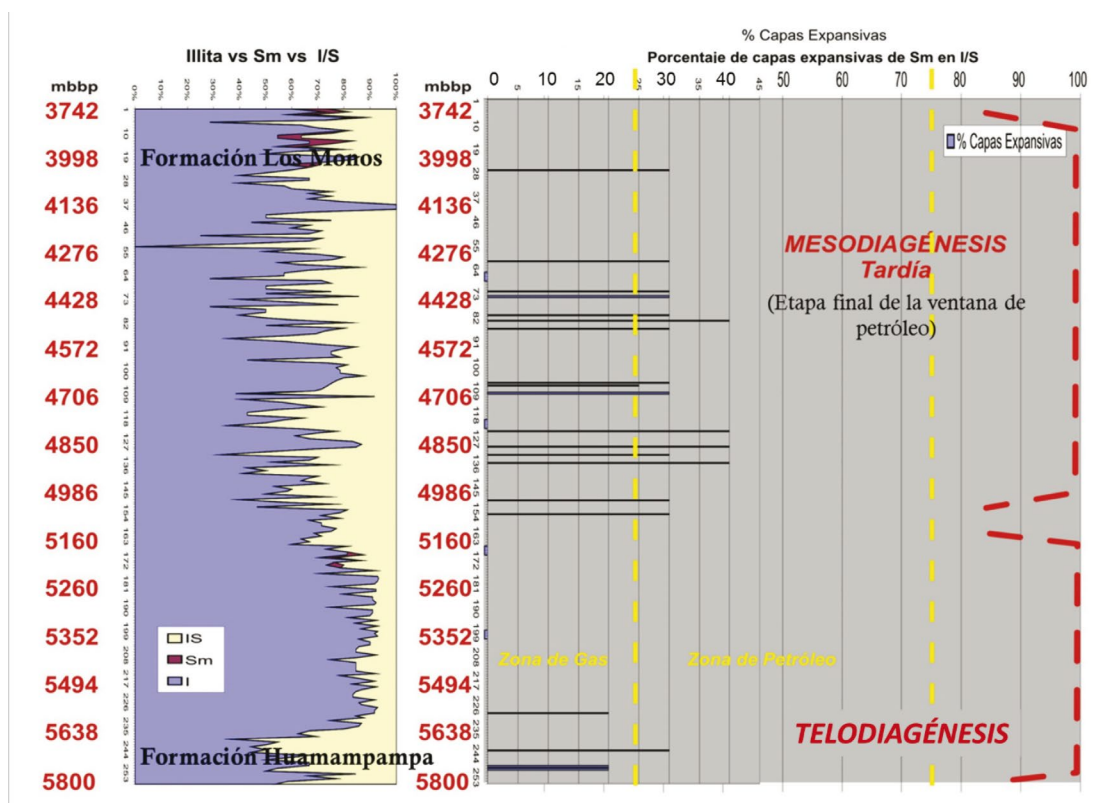


Figura 22. A. Perfil de madurez termal de la Fm. Los Monos en el pozo Tacobo x-1001.

Pozo	Zona	Tipo de material	Estratigrafía	Profundidad (mbbp)	Edad	Color de esporas fósiles/polen	Madurez termal orgánica	COT (%)
YPF.Ve.x-1	Vespucio	Corona	Fm Los Monos	3816	Dev. Inferior	4.4	Gas seco	0.47
						3	Petróleo	
YPF.ST.ET.x-1	El Tunal	Corona	Devónico? Fm Cachipunco?	2116	Devónico?	4	Gas seco	0.44
YPF.ST.P.C.xp-7 (I)	Peña Colorada	Corona	Fm Los Monos?	3918	Dev. Medio?	2+, 3-	Petróleo	0.41
YPF.ST.A.B.xp-13	Aguas Blancas	Corona	Fm Los Monos?	2810	Dev. Medio?	3, 3-	Petróleo	0.72
YPF.ST.A.B.xp-13	Aguas Blancas	Corona	Fm Icla?	3056	Dev. Inferior?	3-	Petróleo	0.90
YPF.ST.R.xp-12	Ramos	Corona	Fm Los Monos	2713	Dev. Medio	2+, 3-	Petróleo	0.80
						2+	Petróleo	
YPF.ST.A.Cu.x-1	Anticlinal Cuchuma	Corona	Devónico? Fm Cachipunco?	3275	Silúrico?	sin esporas	sin esporas	0.19
YPF.ST.TA.x-1	Tartagal	Corona	Devónico?	4030	Devónico?	3+, 4-	Gas seco	0.05
YPF.ST.TA.x-2	Tartagal	Corona	Devónico?	3909	Devónico?	3, 3-	Petróleo	1.09

Tabla2. Datos geoquímicos y de madurez termal de muestras devónicas del área de estudio. Nótese la madurez termal en ventana de petróleo de la mayoría de las muestras, en su mayoría pertenecientes a la Fm Los Monos.

CONCLUSIONES

En función de las facies sedimentarias y las icnofacies descriptas para la Fm. Los Monos se puede interpretar que pertenece una plataforma somera, por debajo del nivel de olas de buen tiempo (afectada por tormentas) con influencia deltaica.

Desde el punto de vista textural, las arcillas son laminadas y detríticas, es decir, no producen pérdida de porosidad (excepto algunos niveles del pozo Ramos).

Desde el punto de vista mineralógico, la roca total promedio está compuesta principalmente por cuarzo (70%), plagioclasa (10%) y arcillas (20%). En cuanto a la mineralogía de la fracción arcilla se caracteriza por la presencia en promedio de illita (45%), illita/esmectita (20%), clorita (25) y caolinita (10%) (Fig. 20). Si bien se observa que hacia el pozo Tcb.x-1001 aumenta el contenido de carbonatos y la presencia de clorita.

En general, el porcentaje, tipo y características texturales de las arcillas de la Fm Los Monos no impactarían negativamente en la geomecánica y petrofísica de la roca.

La Formación Los Monos presenta una marcada variabilidad litológica y mineralógica en sentido vertical, sin evidenciar tendencias marcadas. En sentido regional, se observa un ligero aumento de carbonatos y caolinita hacia el norte, centro de cuenca.

Es interesante señalar que tanto el índice de vitrinita como el IAT arrojan valores de diagénesis inferiores a los aportados por el método de la medición de capas expansivas en los interestratificados IS.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos especialmente a la Lic. Cecilia Genazzini y al Sr. Pablo García del Centro de Investigaciones Geológicas (CIG), La Plata, por el procesamiento de las muestras por Difracción de Rayos X. A las autoridades de Pluspetrol por permitir la realización y publicación de este trabajo.

REFERENCIAS CITADAS

- | | |
|---|---|
| <p>Azcuy, C.L. y M. M. di Pasquo, 2000, "Carbonífero y Pérmico de las Sierras Subandinas, Cordillera Oriental y Puna", en R. Caminos (eds.), Geología Argentina, Instituto de Geología y Recursos Minerales, Anales 29 (11): p. 239-260. Buenos Aires.</p> <p>Boso, M. A., C. R. Monaldi y J. A. Salfity, 1983, "Silúrico y Devónico del noroeste argentino: investigaciones en desarrollo", Yacimientos Petrolíferos Fiscales Bolivianos, Revista Técnica 9 (1-4): p. 137-142.</p> | <p>Cerqueira y Schulz, 1998, "Origin of Petroleum of Duran Oil Field-Noroeste Basin, Argentina", American Association of Petroleum Geologists, Conference, Rio de Janeiro, Abstracts, p. 144-145.</p> |
|---|---|

- Cruz, C. E., C. A. Sylwan, y H. J. Villar, 2002, "La Cuenca de Tarija, Bolivia y Noroeste de Argentina: ¿Sistema petrolero único o múltiples sistemas petroleros?", V Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, IAPG, CD Trabajos Técnicos, Mar del Plata.
- di Pasquo, M.M., 2007, "Asociaciones palinológicas en las formaciones Los Monos (Devónico) e Itacua (Carbonífero Inferior) en Balapuca (Cuenca Tarija), sur de Bolivia, Parte 1", Geología, estratigrafía y asociaciones de la Formación Los Monos, Revista Geológica de Chile 34 (1): p. 97-137.
- Disalvo, A. y H. J. Villar, 1998, "The Petroleum system of Post-Devonian reservoirs in the Eastern Tarija Basin, Chaco Plain, Argentina", VI Latinamerican Congress on Organic Geochemistry, CD-ROM, p. 5, Margarita.
- Disalvo A. y H. J. Villar, 1999, "Los sistemas petrolíferos del área oriental de la cuenca Paleozoica Noroeste, Argentina", IV Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, IAPG, Actas Trabajos Técnicos, Mar del Plata.
- Dunn, J. F., K. G. Hartshorn y P. W. Hartshorn, 1995, "Structural Styles and Hydrocarbon Potencial of the Sub-Andean Thrust Belt of Southern Bolivia", en A. J. Tankard, R. Suárez S., y H. J. Welsink (eds.) Petroleum Basins of South America, American Association of Petroleum Geologist Memoir, 62: p. 523-543, Tulsa.
- Foscolos, A. E., T. G. Powell y P. R. Gunther, 1976, "The use of clay minerals and inorganic and organic geochemical indicators for evaluating the degree of diagenesis and oil generating potential of shales", Geochimica et Cosmochimica Acta, Volume 40 (8): p. 953-966.
- Hernández, N., M. Iribarne, D. Aprea, G. Laffitte y G. Vergani, 2011, "Nuevos conceptos estructurales a partir de la perforación del pozo profundo Ramos XP-2012 en el Yacimiento Ramos, Sierra de San Antonio, provincia de Salta".
- María S., J. Reynaldi y M. Iribarne, 2013, "Caracterización del potencial generador de la Formación Los Monos (Devónico inferior a medio) a partir de análisis de recortes (cutting) y registros de pozo del Campo Tacobo, Bolivia", Taller Recursos gasíferos convencionales y no convencionales", Santa Cruz, Bolivia. Arpel.
- Miranda, A.P., C. E. Souza Cruz y J. Oller, 2000, "Sequence stratigraphy of the Late Silurian-Devonian Subandean Basin, Southern Bolivia and Northern Argentina", XIV Congreso Boliviano de Geología, Memorias: p. 46-50, La Paz.
- Moretti, I., 1997, "Maduration and migration of hydrocarbons: South and central Sub Andean Zone of Bolivia", Oil and Gas Exploration and Production en Fold and Thrust belts, American Association of Petroleum Geologist, Research Symposium, p. 1-5, Veracruz.
- Moretti, I., E. Díaz Martínez, G. Montemurro, E. Aguilera y M. Pérez, 1994, "Las rocas madre de Bolivia y su potencial petrolífero: Subandino-Madre de Dios-Chaco", Revista Técnica de YPF, 15 (3-4): p. 293-317, Cochabamba.
- Moretti I., P. Baby, E. Mendez y D. Zubieta, 1996, "Hydrocarbon Generation in relation to thrusting in the Sub-Andean zone from 18° to 22° S", Petroleum Geoscience 2: p. 17-28, Bolivia.
- Neasham, T., 1977, "The morphology of dispersed clay in sandstone reservoirs and its effects on sandstones shaliness, pore space and fluid flow properties", SPE paper 6858.
- Powel, T. G., A. E. Foscolos, P. R. Gunther y L. R. Snowdon, 1978, "Diagenesis of organic matter and fine clay minerals: a comparative study", Geochimica et Cosmochimica Acta, 42: 1187 - 1197

- Sams, M. y M. Andrea, 2001, "The effect of clay distribution in the elastic properties of sandstones", *Geophysical Prospecting*, 49, 128-150.
- Sempere, T., 1995, "Phanerozoic Evolution of Bolivia and adjacent regions" en A. J. Tankard, S. R. Suárez y H. J. Welsink (eds.) *Petroleum basins of South America*, American Association of Petroleum Geologists, Memoir 62: p. 207-230, Tulsa.
- Starck, D., 1995, "Silurian – Jurassic stratigraphy and basin evolution of Northwestn Argentina", en A. J. Tankard, R. Suarez S. y H. J. Welsink (eds.), *Petroleum Basin of South America*, AAPG Memoir 62: p. 251-267.
- Starck, D., 1999, "Los Sistemas petroleros de la cuenca de Tarija", IV Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, IAPG, Actas Trabajos Técnicos, Mar del Plata.
- Starck, D., E. Gallardo y A. Schulz, 1993a, "Neopaleozoic stratigraphy of the Sierras Subandinas Occidentales and Cordillera Oriental, Argentina", XII International Congress of Carboniferous-Permian, *Comptes Rendus 2*: p. 353-372, Buenos Aires.
- Starck, D., E. Gallardo y A. Schulz, 1993b, "The pre-Carboniferous unconformity in the Argentine portion of the Tarija Basin", XII International Congress of Carboniferous-Permian, *Comptes Rendus 2*: p. 373-384, Buenos Aires, Argentina.
- Starck, D., L. Constantini y A. Schulz, 2002, "Análisis de algunos aspectos geométricos y evolutivos de las estructuras de la faja plegada subandina del norte de Argentina y el sur de Bolivia", En V Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos.
- Suárez Soruco, R., A. D. Farjat y L. Smith, 2000, "Subdivisión tectono-estratigráfica de las rocas del Ciclo Cordillerano de Bolivia" en XIV Congreso Geológico de Bolivia.
- Vistalli, M. C., 1989, "La cuenca Silúrica-Devónica del noroeste", en G. Chebli y L. Spalletti (eds.), *Cuencas Sedimentarias Argentinas* en Instituto Superior de Correlación Geológica, Universidad Nacional de Tucumán, Serie Correlación Geológica 6: p. 19-41, Tucumán.
- Visser, R., K. Baur, y J. von Baaren, 1988, "Effective porosity estimation in the presence of dispersed clay", SPWLA.

