

Exploración Regional No Convencional a escala de Cuenca: Madre de Dios (Bolivia - Perú)

Autor(es): E.M. Micucci, Tecpetrol, A. Bande, Tecpetrol, R.D. Veiga Tecpetrol

Categoría: Marque con una "X"

- Artículo Técnico
- Tesis Pregrado
- Tesis Posgrado

Derechos de Autor 2022, ACIPET

Este artículo técnico fue preparado para presentación en el XIX Congreso Regional Colombiano de Petróleo, Gas y Energía organizado por ACIPET en Cartagena, Colombia.
Este artículo fue seleccionado para presentación por el comité técnico de ACIPET, basado en información contenida en un resumen enviado por el autor(es).

Resumen

La cuenca de Madre de Dios es una cuenca subandina desarrollada principalmente en Bolivia y Perú. Durante el Devónico se acumuló una espesa sucesión sedimentaria (> 1.000 m en las zonas más profundas) de sedimentos clásticos de ambiente marino parte de las cuales podrían tener interés como reservorios no convencionales. Es una cuenca escasamente explorada, con pocos pozos distribuidos irregularmente y sísmica 2D que la cubre en forma parcial. Los pozos del sector boliviano muestran un intervalo de unos 150 metros, con potencial como reservorio No Convencional en la Base de la F. Tomachi (Devónico Superior). Estos niveles no presentan las mismas características faciales en los pozos perforados en el lado peruano. Se ha realizado un trabajo de integración de toda la información geológica y geofísica disponible en ambos países, junto con el relevamiento de otros factores que son muy importantes de cara a una explotación no convencional para tratar de determinar un posible potencial exploratorio de estas unidades de edad devónico tardío. El resultado de este trabajo es la delimitación de un extensa área en la parte central de la cuenca que, a priori, reúne condiciones para una exploración con este tipo de objetivos.

Introducción - Objetivos

El éxito del Play No Convencional (gas y petróleo) Vaca Muerta en la Cuenca Neuquina, en Argentina, ha alentado la búsqueda de nuevos plays de ese tipo dentro de Sudamérica. A pesar de poseer más de 100 cuencas sedimentarias "onshore" a lo largo de todo el Fanerozoico; este subcontinente no muestra, en líneas generales demasiadas unidades con potencial para desarrollar este tipo de Yacimientos. Diversos factores se han combinado para llegar a esta situación: a) en la parte occidental del continente la mayoría de las rocas madre han necesitado de la orogenia andina para lograr un soterramiento que les permita alcanzar la madurez necesaria para generar hidrocarburos. Actualmente estas rocas están muy profundas (F. Ene en Perú), o están mayormente estructuradas y / o erosionadas (F. La Luna y equivalentes en gran parte de Colombia y Venezuela, F. Los Monos en Bolivia) o se presentan en facies delgadas intercaladas con niveles reservorio (Gr. Napo en Ecuador). b) en la parte oriental de Sudamérica, la mayoría de las cuencas onshore necesitaron la presencia de intrusivos ígneos para que la roca madre alcanzara la madurez necesaria para la generación de hidrocarburos. Esto implica que las zonas maduras son muy irregulares lo cual complica su explotación no convencional.

La cuenca de Madre de Dios es una cuenca originada en el Paleozoico temprano, que con intermitencias ha estado activa hasta el presente. Se desarrolla mayormente en territorio peruano y en boliviano y tiene una superficie de unos 150.000 km² aproximadamente. Posee una docena de pozos exploratorios en total en ambos países por lo que se trata de una cuenca subexplorada.

En esta cuenca se encuentra la Formación Tomachi (Devónico: Frasniano) la cual ha sido descrita como una "world class source" rock en base a su source potential index de 18 tonHc/sqm (Peters et al., 1997¹). Desde hace algunos años, diversos autores han postulado un posible interés como reservorio No Convencional para esta unidad (Timoteo, 2015², Schneider et al. 2018³)

El objetivo de este trabajo es realizar un análisis regional integrado del potencial exploratorio del Devónico Superior de Madre de Dios como Reservorio No Convencional sin tener en cuenta los límites geográficos entre países, y considerando adicionalmente factores extra geológicos como ser: infraestructura, presencia de zonas naturales protegidas, vías de comunicación y acceso, etc.

El resultado de este estudio es un "Play Concept Map" donde se destaca una zona de más de 30.000 km² donde la Formación Tomachi tendría potencial como reservorio no convencional. Para construir este mapa se tuvo en cuenta las variaciones en profundidad,

madurez y litológicas de esta unidad. Dentro de la zona delimitada no hay pozos perforados y en consecuencia es un “play” que aún no está probado. Es necesaria la perforación de pozos con objetivo no convencional en la cuenca de Madre de Dios para su validación.

AREA DE ESTUDIO

La cuenca de Madre de Dios se desarrolla en Perú y Bolivia. Se encuentra ubicada al SE de la cuenca Ucayali, entre los 12° y 14° de latitud sur y entre los 69° y 72° de longitud oeste, con dirección NW-SE. Está limitada por principales componentes tectónicos como la zona subandina ubicada al S-SW. Al Este, se prolonga hacia el escudo brasileño, al W-NW con el arco de Fitzcarrald y la cuenca Ucayali, en dirección SE la cuenca Madre de Dios se prolonga hasta el Norte de Bolivia donde la parte estructurada se conoce como Cuenca de Beni. En total tiene una superficie que supera los 150.000 km². El área de estudio tiene unos 75.000 km² (figura 1) y abarca la mayor parte de la cuenca exceptuando 3 sectores: la zona profunda que se desarrollan en el sector peruano, el sector deformado y aflorante por la orogenia Andina al W y los bordes de la cuenca donde no se cuenta con datos sísmicos. Geográficamente, la cuenca se desarrolla principalmente en Bolivia y Perú y una pequeña zona en territorio brasilero (Figura 1). Por esta razón existen escasos trabajos publicados donde se integren los datos de ambos países. Uno de los objetivos de esta contribución es realizar esta necesaria integración.

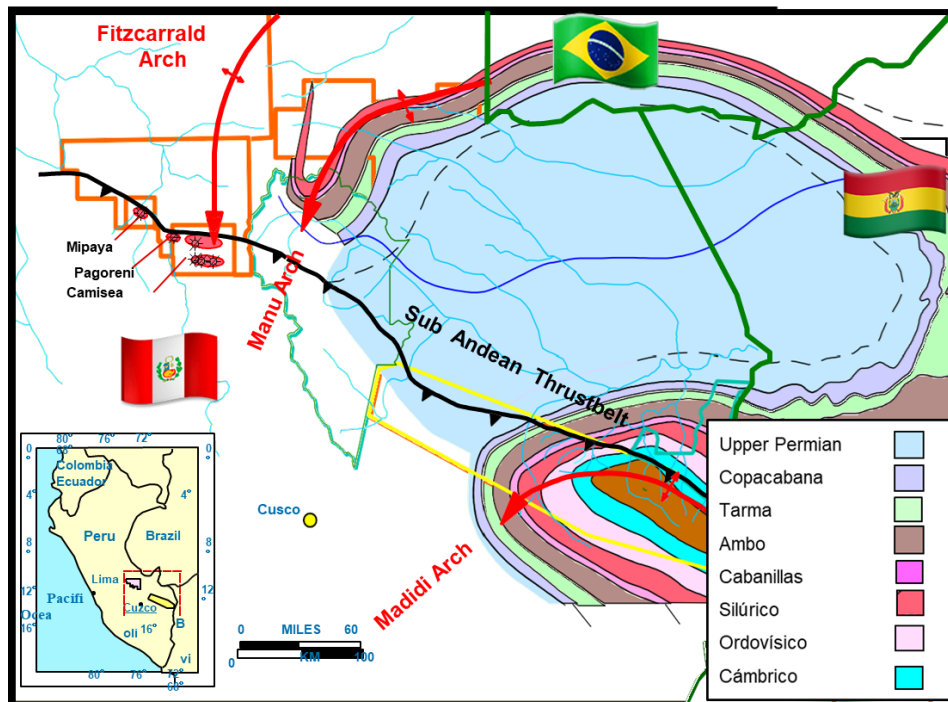


Figura 1. Mapa de ubicación de la cuenca paleozoica de Madre de. Modificado de House *et al* (1999⁴).

HISTORIA GEOLOGICA DE LA CUENCA DE MADRE DE DIOS.

La historia geológica de la cuenca es compleja y abarca, en forma discontinua, desde el Paleozoico Inferior al Holoceno con un espesor sedimentario total de hasta 9 km en las partes más profundas que se encuentran en el sector Peruano. Gran parte de su historia geológica es compartida con el resto de las cuencas de Antepais de Perú: Marañón, Ucayali, Santiago, Ene. Un hecho a destacar es que la mayor parte de los trabajos publicados se focalizan en la evolución geológica en Perú o en Bolivia de manera excluyente. Existen escasos trabajos donde se realiza una integración de los datos en ambos países, entre ellos se pueden destacar los trabajos de Peters, *et al.*, 1997 *op. cit* y Aleman y León 2008⁵).

Una síntesis del conocimiento estratigráfico integrado de la cuenca en ambos países puede observarse en la figura 3.

Paleozoico

El basamento de la cuenca, el cual no aflora ni ha sido atravesado por ningún sondeo sería parte de lo que se conoce como Cratón de Guaporé, el cual está compuesto por rocas metamórficas de bajo grado correspondientes a la Fm. Pilcopata (Cámbrico) (Aleman y León, 2008 *op. cit.*).

La cuenca habría tenido su origen en el Ordovícico como una cuenca de tipo intracratónica. En la información sísmica del lado boliviano pueden verse reflexiones correspondientes a rocas de esta edad que se apoyan en relación de “onlap” sobre el Basamento. Estas rocas se asignan tentativamente al Gr. Carabata (Ordovícico/Silúrico?) (Schneider *et al.*, *op. cit.*). Unidades equivalentes habrían sido perforadas en el sector boliviano de la cuenca, aunque no se disponen de edades bioestratigráficas en este intervalo (Mobil, 1993 ⁶).

A fines del Silúrico – comienzos del Devónico se conectan las cuencas aisladas conformando una cinturón que rodea los núcleos cratónicos de sudamérica. (Figura 2) Esto sucede desde el W de Colombia hasta el centro de Argentina en la zona andina. Para estos tiempos toda Gondwana se encontraba en una posición austral, con el polo sur ubicado en el límite entre Sudamérica y África.

La secuencia devónica en Madre de Dios está representada por rocas sedimentarias clásticas de grano fino: lutitas y limolitas que corresponden a las Formaciones Tequeje y Tomachi en el sector Boliviano de la cuenca y a la F. Cabanillas como se denominan estos depósitos del lado peruano. En Bolivia se pueden reconocer dos grandes ciclos marinos regresivos que gradan de lutitas de offshore a facies arenosas proximales; estos dos ciclos se corresponden con las Formaciones Tequeje y Tomachi, respectivamente. El espesor total de esta sección es cercano a los 1000 m (Aleman *et al.*, 2003 ⁷). y se interpreta que tuvieron zona de aporte desde el Macizo de Arequipa en el Oeste y el cratón desde el Este (Issacson, 1974 ⁸).

Luego sigue un periodo bastante complejo en la historia geológica de la cuenca, no del todo comprendido, que abarca desde el Eopaleozoico hasta el Mesozoico. En líneas generales puede decirse que este período está ligado a los procesos tectónicos que llevaron a la conformación de Gondwana a fines del Paleozoico y a su posterior fragmentación durante el Cretácico

En Madre de Dios una importante discordancia angular que separa el Paleozoico inferior del superior. Los depósitos ubicados por debajo de la discordancia consisten en una secuencia intercalada de rocas clásticas de origen no marino y volcánica y carbonatos de ambiente somero que corresponden a los Grupos Ambo, Tarma y Copacabana (Newel, *et al.*, 1953 ⁹). En Bolivia está representado por los Grupos Retama y Copacabana (Figura 2).

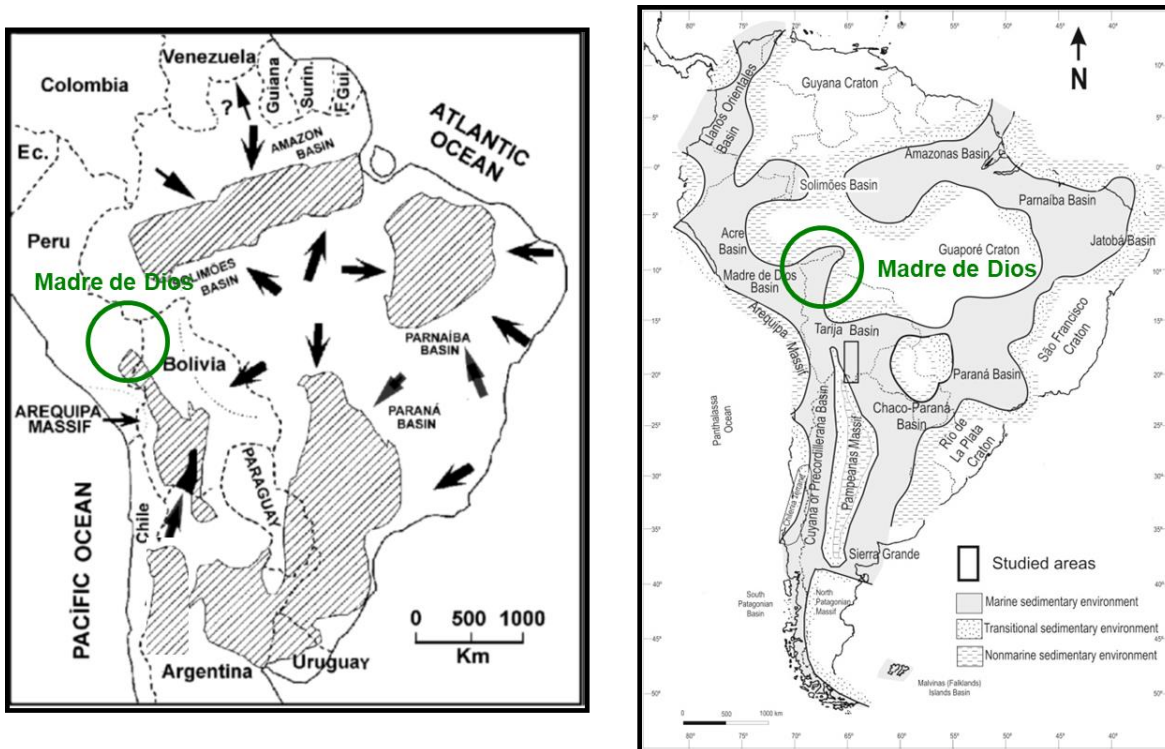


Figura 2 Izquierda Cuenca silúricas de Sudamérica tomado de Cooks (2005 ¹⁰). Derecha Cinturón de cuencas devónicas. Tomado de Caputo M., & Dos Santos R. (2019 ¹¹).

Mesozoico

El registro Mesozoico comienza luego de una nueva discordancia angular de carácter regional, que puede seguirse en varias de las cuencas vecinas de Perú: Ucayali, Maraón, Ene, etc. En Madre de Dios la discordancia estaría relacionada a un proceso de inversión de la cuenca con su consecuente erosión relacionada (Schneider *et al.*, 2016¹²). La litología de estos depósitos está compuesta por rocas clásticas, no marinas, las cuales en Bolivia se asignan a las Formaciones Beu, Eslabón y Flora y en el Perú, cuencas de Madre De Dios, Ucayali, Maraón, Ene, etc se correlacionan con las formaciones Chonta y Vivian (Aleman y León, 2008 op. cit).

Cenozoico

En el Cenozoico comienza la etapa de Cuenca de Antepais en Madre de Dios. Hasta el Mioceno medio, todas las cuencas subandinas peruanas formaban parte de una sola cuenca amazónica que se encontraba sometida a incursiones marinas como el mar de Pebas. Hace aproximadamente 10 Ma, se iniciaron los corrimientos y los movimientos de levantamiento y subsidencia que propiciaron la formación de las cuencas subandinas actualmente definidas (Baby *et al.*, 2005¹³). El levantamiento de la Cordillera de los Andes produjo una importante subsidencia flexural en toda la cuenca que facilitó la depositación y preservación de una importante secuencia sinorogénica que alcanza sus mayores espesores en el sector peruano de la cuenca donde supera los 3.000 m en las zonas mas profundas (Uba *et al.*, 2006¹⁴). Parte de esta secuencia va a ser fuertemente estructurada conformando una Faja Plegada y Corrida la cual ha sido objeto de exploración petrolera. Como resultado de este proceso, la geometría de la cuenca tiene un perfil marcadamente asimétrico con un claro aumento de espesor hacia el sudoeste.

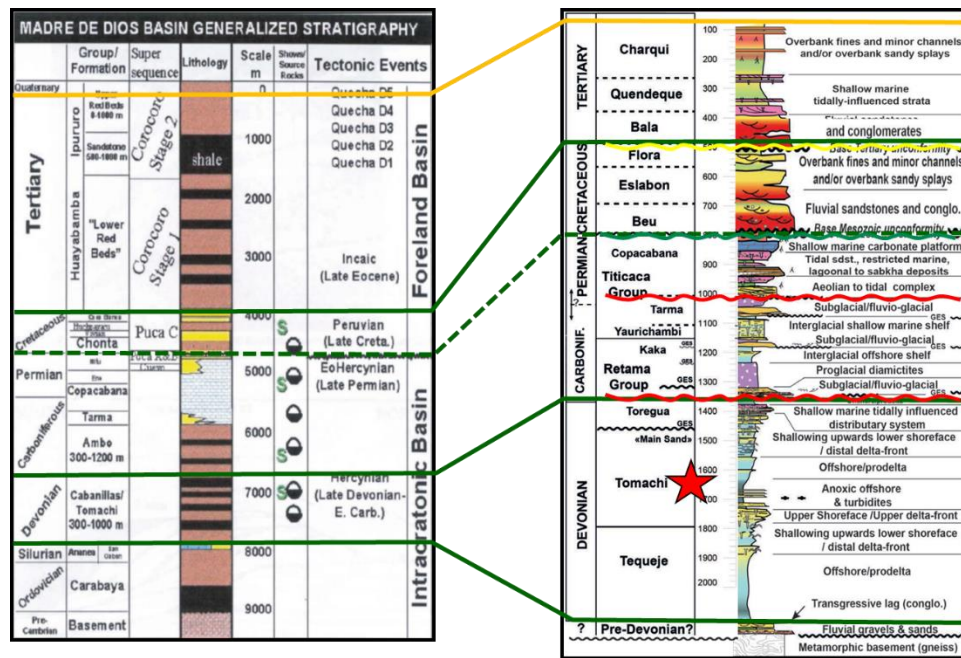


Figura 3. Columna litológica y estratigráfica para la cuenca de Madre de Dios, mostrando la equivalencia entre las unidades descritas en Perú y en Bolivia. Modificado de Aleman y Leon (2008, op. cit.) y Schneider *et al.*, (2018 op. cit)

EXPLORACIÓN EN LA CUENCA DE MADRE DE DIOS

Madre de Dios es una cuenca subexplorada con un tamaño mayor a los 150.000 km² y sólo 12 pozos exploratorios que brindan información de subsuelo en forma parcial porque son muy pocos los que llegan hasta el Basamento de la cuenca (Figura 4).

La información sísmica está constituida exclusivamente por un irregular mallado de sísmica 2D registrada en múltiples campañas a lo largo de los últimos 50 años.(Figura 5). En el sector peruano esta información está concentrada en la parte central de la cuenca, en el sector Boliviano está más homogéneamente distribuida.

En el sector peruano, los primeros pozos se perforan en la década del 70. En total son 4 los pozos que registran ensayos con petróleo en diferentes niveles paleozoicos, pero estos no resultan económicos y son abandonados. En la década de los 90, se perfora el primer pozo en Bolivia, el Pando.x-1 que descubre una acumulación de petróleo con caudales auspiciosos en las areniscas devónicas de la Formación Tomachi. A este pozo le siguieron cuatro pozos más en un corto período, buscando delimitar el descubrimiento realizado. El

resultado de estos pozos es desalentador ya que se comprueba que la acumulación de hidrocarburos era mucho más pequeña de lo esperado, por lo cual decae el interés en la cuenca. El análisis posterior de la información de estos pozos: perfiles, descripciones de cutting, estudios especiales, etc es el que llama la atención sobre el posible potencial No Convencional de los niveles devónicos.

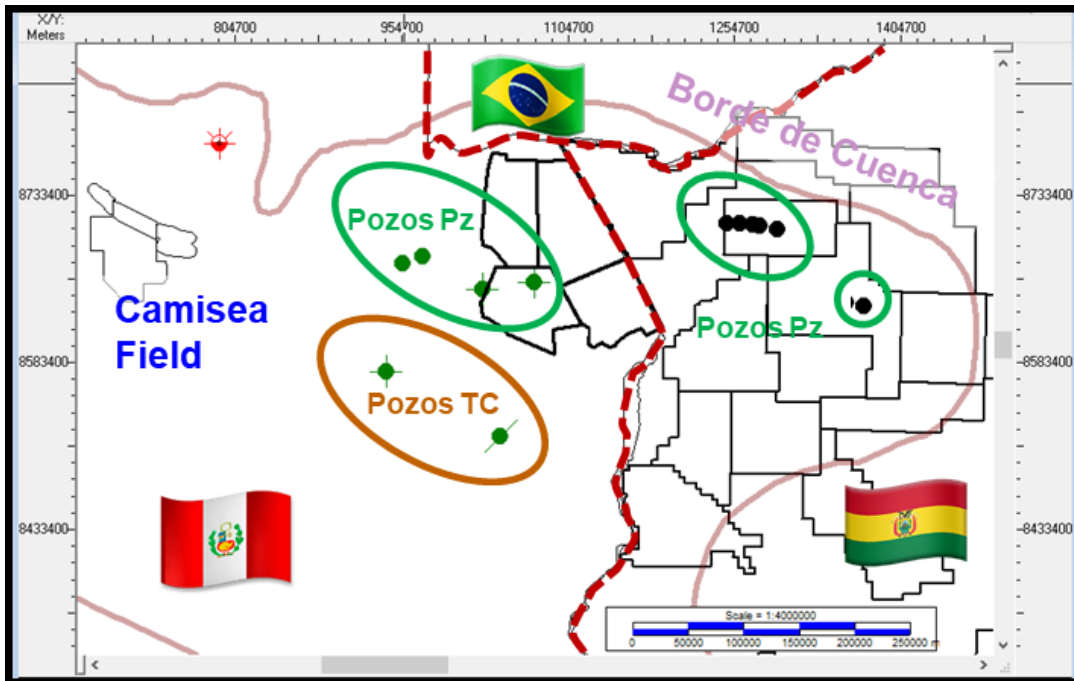


Figura 4: Pozos perforados en la cuenca de Madre de Dios con el detalle de la profundidad a la cual llegaron.

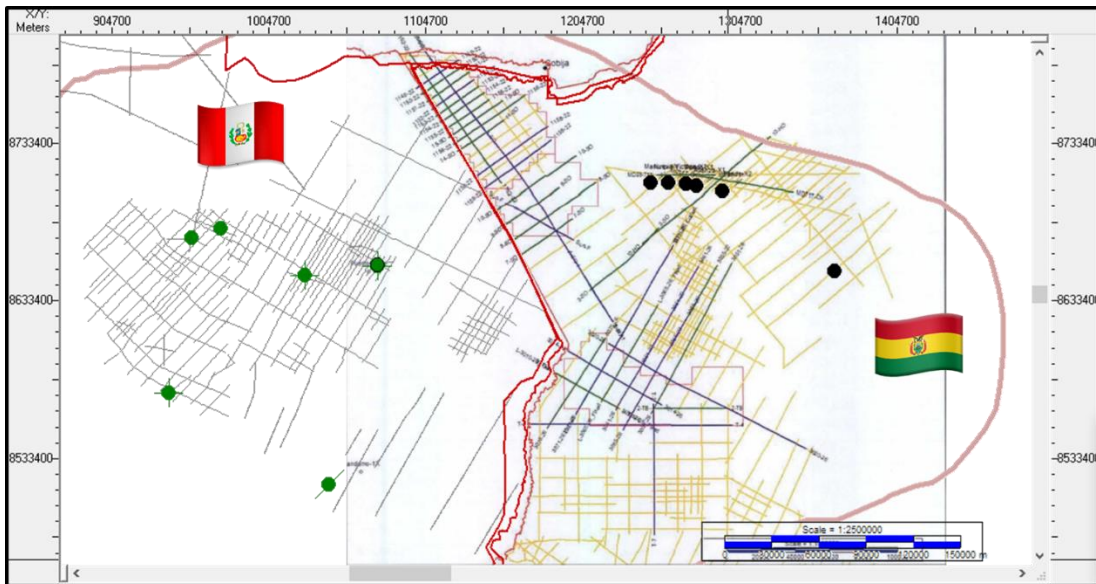


Figura 5: Información sísmica en la cuenca de Madre de Dios.

A fines de los 90, en Perú, se perforan los pozos Candamo en la zona de la faja plegada en el sur de la cuenca buscando un nuevo play exploratorio: La Faja Plegada y Corrida. El pozo descubre una pequeña acumulación en niveles arenosos de la Formación Nía que

resultó subeconómica. Recientemente YPFB reanuda los estudios en la cuenca y en 2021 perfora el pozo Gomero x-1, con un doble objetivo: una trampa estructural convencional para los depósitos Siluricos y evaluar el potencial no convencional de los niveles Devónicos de la Fm. Tomachi que habían mostrado potencial No Convencional en el Pozo Pando -1.

ANALISIS DE FACTORES CLAVES DEL PLAY DEVÓNICO NO CONVENCIONAL

1) Estratigrafía

El Devónico en la cuenca de Madre de Dios es de origen marino. Se inicia como un ciclo transgresivo constituido por lutitas negras y grises, limolitas y areniscas subordinadas con alcanza un espesor mayor a los 1000 m (PeruPetro, 2002¹⁵). En Perú está representado por la Fm. Cabanillas, mientras que en Bolivia lo hacen las Formaciones Tequeje y Tomachi (Figura 6).

En el sector boliviano la Fm. Tequeje representa una inundación y muestra un claro arreglo estrato y grano creciente. Mayormente está formada por lutitas de *offshore* que gradan hacia el tope a facies heterolíticas altamente bioturbadas de ambiente de *shoreface* (Mobil, 1993 op. cit). El ambiente sedimentario de Tequeje se interpreta como una evolución de un ambiente marino de *offshore* hacia un ambiente deltaico siguiendo una clara tendencia regresiva. La edad de la unidad es asignada al Devónico inferior (Praggiano) (Mobil, 1993 op.cit.). Por encima de una paraconcordancia, que es además una superficie transgresiva se deposita la Formación Tomachi. Esta unidad posee una edad Devónico Superior (Frasniano – Fameniano) (Over *et al.*, 2009¹⁶), implicando una importante discordancia intradevónica en la cuenca de Madre de Dios en la cual el Devónico Medio no se depositó o fue erosionado. Al Igual que la unidad infrayacente, la Fm. Tomachi representa una inundación de la cuenca a la que se sobrepone un arreglo regresivo hacia el techo (Figura 7).

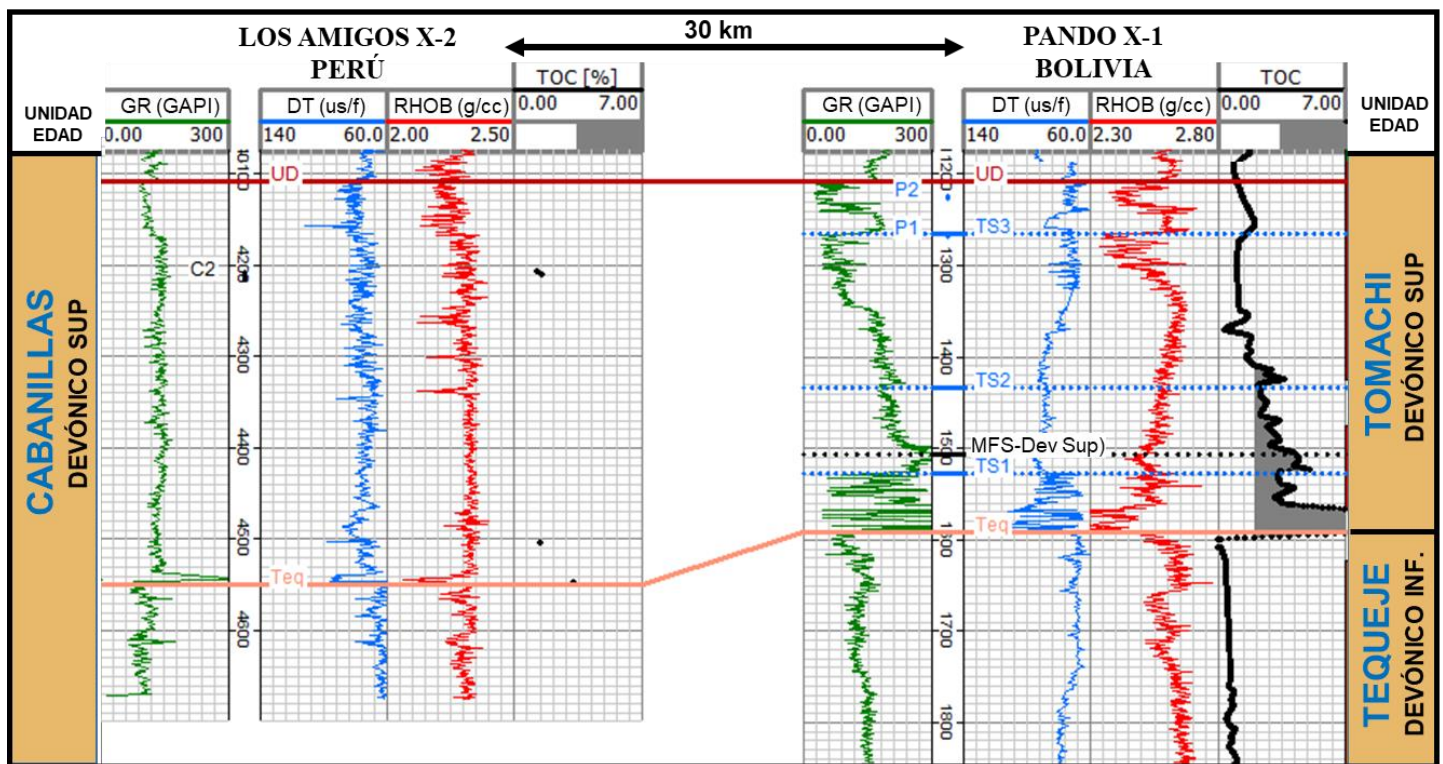


Figura 6. Interpretación estratigráfica y correlación de la sección Devónica Superior entre el sector peruano y boliviano mostrando las variaciones entre las características de la unidad.

La Fm. Tomachi en los pozos bolivianos se dividió en al menos 3 ciclos con un arreglo transgresivo-regresivo (T-R). En el ciclo basal, culminado por la superficie TS1, presenta los valores más bajos de densidad y en consecuencia los valores más altos de COT (hasta 16%) (Figura 6B). Por arriba se desarrolla un nuevo ciclo T-R que culmina con la superficie TS2. Este ciclo contiene a la superficie de máxima inundación para el ciclo de la Fm. Tomachi (MFS- Dev Sup, Figura 3A) y en consecuencia es el ciclo con menores variaciones en los pozos analizados. Los valores de carbón orgánico total (COT) varían entre 1 y 5 %, presenta bajos valores de densidad y mayores valores de oil saturation index (OSI, Jarvie *et al.*, 2011¹⁷). Estas características y su extensa continuidad lateral lo presentan como un nivel óptimo desde el punto de vista de reservorio no convencional. En el tercer ciclo T-R culminado por la superficie TS3 los valores

de COT en la sección transgresiva disminuyen y el mismo ciclo es culminado por niveles de areniscas que fueron depositadas en un ambiente deltaico (Schneider *et al.*, 2018 op cit) con proveniencia desde el Cratón de Guaporé (Giusiano *et al.*, 1998¹⁹). Este paquete arenoso contiene a la denominada *Main Sand* (Mobil, 1993 op.cit) intervalo descubridor de hidrocarburos convencionales.

Por su parte en el sector peruano la Fm. Cabanillas está compuesta por limolitas grises oscuras y limolitas micáceas en las que se intercalan delgados bancos de areniscas finas. En comparación con el sector boliviano el desarrollo de estratos arenosos es menor, mostrando una posición distal con respecto a la zona de aporte ubicada al E. Hacia la base del pozo Los Amigos se observa un sutil aumento en los perfiles de densidad y DT que podría correlacionarse con el techo de la Fm. Tequeje y la discordancia intradevónica descrita en el sector boliviano. Este análisis concuerda con los estudios palinológicos realizados por Mobil y PeruPetro (1995²⁰). que le asignan una edad frasniana - fameniana a la sección presente en el pozo Los Amigos x-2. Sin embargo, en esta ubicación los valores de COT son más bajos (1 a 3 %wt), no hay deflexiones en los perfiles de densidad ni de tiempo de tránsito sísmico que involucren un espesor considerable. Se observaron rastros de petróleo y gas en una corona obtenida en el pozo Los Amigos x-2, pero se le asigna un bajo potencial a la Fm. Cabanillas como reservorio no convencional.

Geoquímica Orgánica

De acuerdo a los resultados de los pozos perforados por Mobil en la década de los 90s, la Fm. Tomachi fue definida como una *world class source rock* por su altos valores de COT, índice de hidrógeno (IH) y *source potencial index* (Peters *et al.*, 1997 op.cit).

En la base de la unidad los valores de COT llegan al 16%wt, luego esos valores decrecen. Los dos primeros ciclos T-R muestran un espesor de alrededor de 150 m con un COT > 2%wt (Figura 7). El promedio de COT para la Fm. Tomachi en todos los pozos que se analizaron es de 2.2 %wt. Los valores promedio tanto en Cabanillas como en Tequeje son menores; 0,9 y 0,8 % respectivamente (Figura 7A). El potencial de generación de Tomachi es excelente con valores de S1+S2 que llegan a 86 mgHc/gR. Cabanillas y Tequeje muestran potenciales de generación regulares (Figura 7B). El índice de hidrógeno (IH) para Tomachi es muy bueno con valores que superan los 600. Los valores más altos se encuentran en la zona cercana a la MFS-Dev sup de Tomachi.

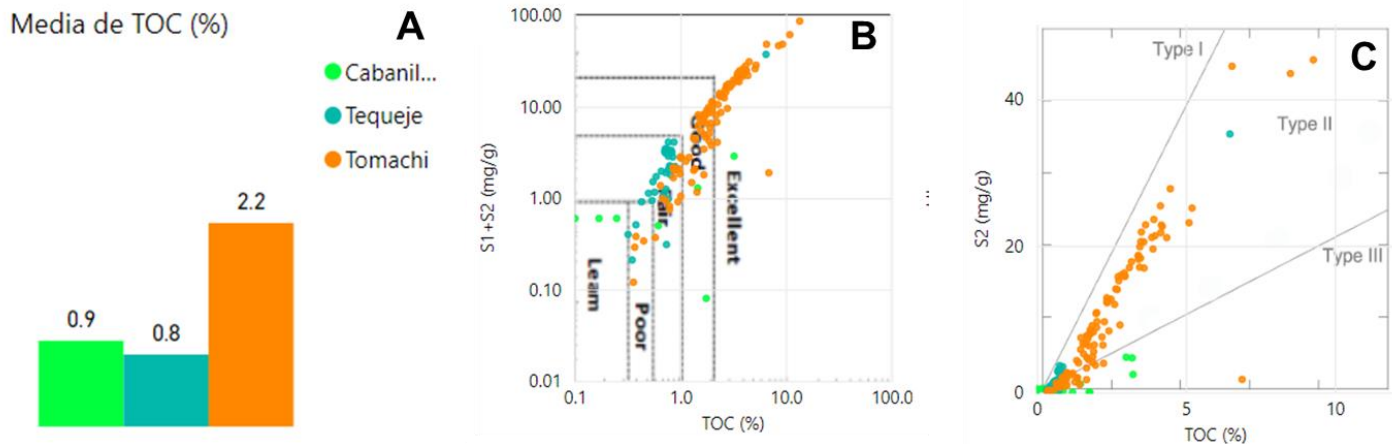


Figura 7. Características geoquímicas del Devónico de la Cuenca de Madre de Dios. En naranja mediciones de la Fm. Tomachi, en verde oscuro la Fm. Tequeje y en verde claro la Fm. Cabanillas. A. Promedio de COT para cada unidad. B. Diagramas de S1+S2vsCOT mostrando el potencial de generación. C. Diagrama S2vsCOT mostrando el tipo kerógeno para las unidades estudiadas. Notar que en los 3 gráficos las características de la Fm. Tomachi difieren en comparación a las otras dos unidades.

En el gráfico S2vsCOT muestra bajos valores de S2 para las Formaciones Tequeje y Cabanillas y un kerógeno tipo III, mientras que en la Fm. Tomachi los valores de S2 aumentan indicando un kerógeno tipo I-II (Figura 7C).

2) Madurez

Los datos de pirólisis (TMax) y reflectancia de la vitrinita obtenidos en los pozos del sector boliviano muestran que los pozos se ubican en una etapa inicial de generación de hidrocarburos. Por su parte, los pozos ubicados en el sector peruano se ubican en la ventana de generación de petróleo con valores que llegan a 0.95% de reflectancia de vitrinita (Mobil y PeruPetro, 1995 op. cit.).

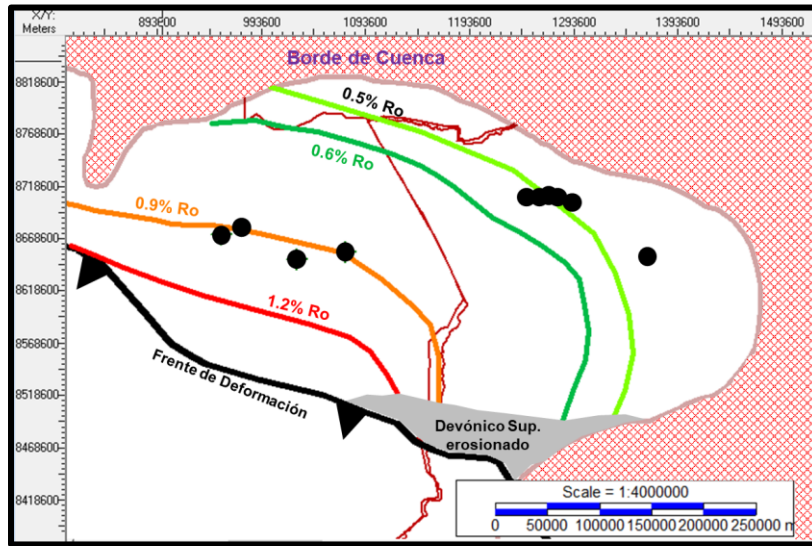


Figura 8. Mapa de madurez para el Devónico Superior de la cuenca de Madre de Dios. Tomado de Peters et al., 1997.op.cit.

En general los estudios de modelados de sistemas petroleros realizados en la cuenca (p.e. Peters *et al.*, 1997 op. cit.; Schneider, *et al.*, 2018 op. cit.) muestran un aumento de la madurez hacia el S de la cuenca en conjunción con un aumento de la secuencia sinorogénica cenozoica (Figura 8). Este arreglo es típico de una cuenca de antepaís andino, en donde el soterramiento asociado a la deformación compresiva es responsable del aumento en la madurez de la roca madre. En base a los modelados de sistemas petroleros los pozos ubicados en el sector peruano estarían en un valor de madurez cercano a la ventana de gas y condensado.

3) Petrofísica

El análisis petrofísico se realizó en el sondeo Pando.x-1 ya que el mismo cuenta con un set completo de registros de rayos gamma (GR), resistivo (RES), sónico compresional (DT) y densidad (RHOB). Asimismo, el pozo cuenta con mediciones de COT, que permiten corregir los valores de densidad modificados por la presencia de materia orgánica, salinidad de agua de formación y del factor volumétrico del petróleo (Bo) para la Fm. Tomachi. La metodología utilizada corresponde a la presentada por Veiga *et al.*, (2018²¹). El análisis se centra en el ciclo 2, zona con mejor potencial no convencional. En las secciones anteriores se mostró que es la zona con menor variaciones laterales y buenas condiciones geoquímicas (alto IH y OSI). En este intervalo los valores de porosidad total (PHIT) calculado fluctúan entre 7 y 15% (Figura 9). Al tope del ciclo 1 y en la base del ciclo se midieron porosidad en muestra de roca entre 10 y 14%. Los valores de saturación de agua (Sw) varían entre 85 y 40%.

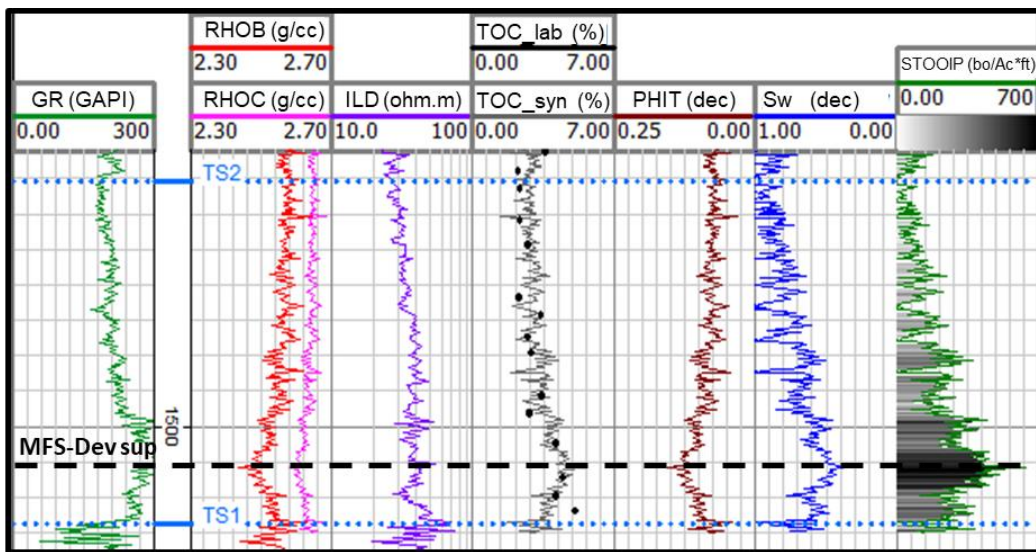


Figura 9. Interpretación petrofísica del ciclo 2 de la Fm. Tomachi. Notar que todos los valores petrofísicos tienen sus mejores características en la zona cercana a la MFS-Dev sup.

A partir de los valores de PHIT, S_w y B_o se estima la capacidad de almacenamiento para la Formación Tomachi que varían entre 200 y 480 bo/acre*pie con máximos en la zona cercana a la MFS-Dev sup (Figura 7). Como comparación, estos valores son menores a los obtenidos en la Fm. Vaca Muerta cuyo almacenamiento varía entre 292 y 696 bo/acre*ft (Veiga *et al*, 2020²²).

4) Estructura

Desde el punto de vista estructural, la cuenca puede dividirse en dos grandes sectores (Figura 10): a) toda la parte central y norte de la cuenca posee una muy baja deformación estructural, donde la información sísmica muestra que la totalidad de la columna está constituida por un suave homoclinal buzante hacia el Suroeste sin plegamientos ni fallas de importancia. Esta es la parte de la cuenca que tendría potencial No Convencional y esta ausencia de tectonismo es un punto favorable muy importante de cara a una hipotética Explotación No Convencional ya que el tectonismo complica las operaciones de fractura y estimulación de los reservorios No Convencionales (Figura 11); y b) el sector Sur y Suroeste de la cuenca, donde la orogenia Andina produjo una fuerte deformación estructural de toda la secuencia terciaria y el Devónico se encuentra ausente por erosión o a una profundidad demasiado elevada como para tener interés como reservorio No convencional.

Esta falta de estructuración en toda la parte central y norte probablemente sea una de las causas principales de la falta de acumulaciones importantes en la cuenca, considerando la gran superficie de roca madre en condiciones de madurez adecuada para haber generado hidrocarburos. En el sector sur, donde se desarrolla la Faja Plegada y Corrida, la ausencia de acumulaciones se asocia a un problema de migración de los Hidrocarburos desde la cocina ubicada en la zona central de la cuenca.

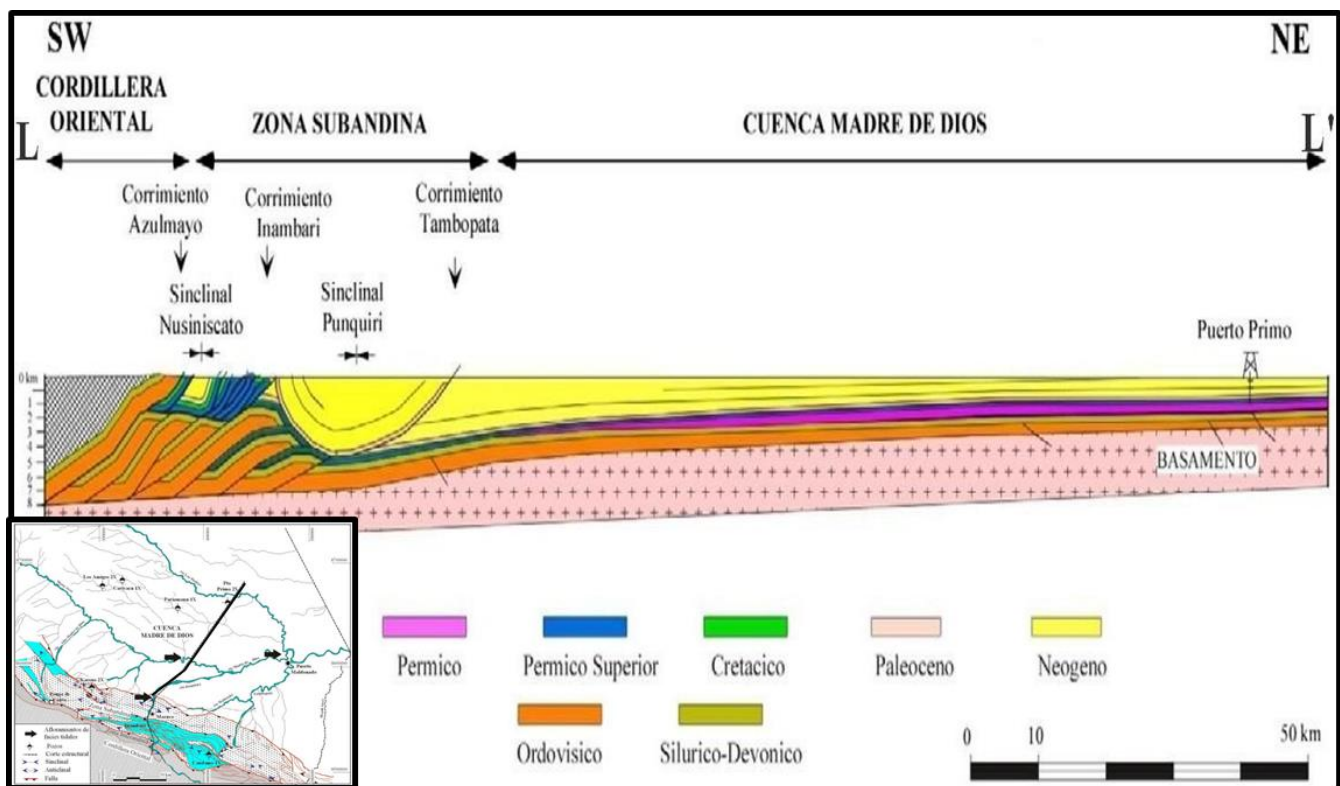


Figura 10. Mapa y sección estructural de la sub-cuenca Madre de Dios. Modificado de Hermoza (2004²³).

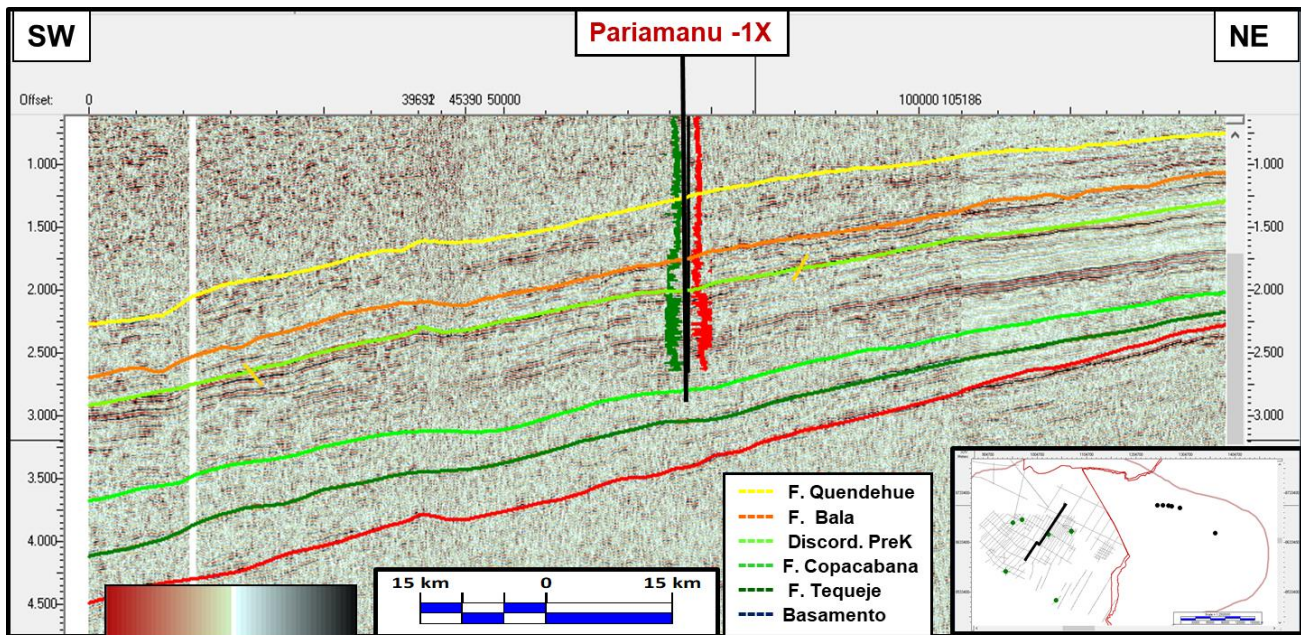


Figura 11. Transecta sísmica en el sector peruano de la cuenca Madre de Dios

5) Extensión areal – Integración de la información geofísica de Bolivia y Perú

A partir de la integración de la información sísmica de Perú y Bolivia se procedió a la realización de mapas integrados de las distintas formaciones para toda la cuenca. (Figura 12)

La cuenca presenta actualmente una forma asimétrica, semicircular producto de la deformación y consecuente soterramiento producido por la deformación andina. Hacia el NO está limitada por el arco de Manu, hacia el S por el frente de deformación andino y hacia el N y E disminuye el espesor cuando todo el relleno de la cuenca se apoya sobre el Cratón de Guaporé. Este aumento de espesor y profundidad hacia el SO permite clasificar a la cuenca del tipo flexural producida por la deformación cenozoica e iniciada en el Oligoceno (Sempere *et al.*, 1990²⁴).

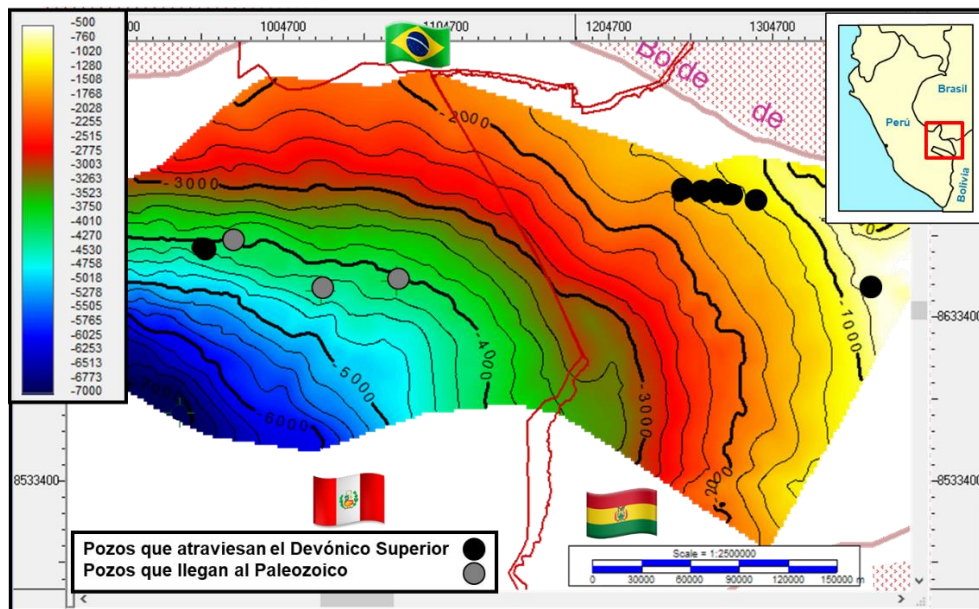


Figura 12. Mapa estructural a la base del Devónico Superior en metros bajo el nivel del mar. En el mapa se observa una secuencia homoclinal con aumento de la profundidad hacia el SO.

En el mapa estructural se observa un bajo grado de fallamiento, mostrando una secuencia fundamentalmente homoclinal (Figura 12). Esta escasez de trampas estructurales desalentó una exploración continua de la cuenca y posiblemente sea uno de los motivos principales de la falta de descubrimientos de hidrocarburos convencionales con escala comercial en la cuenca. El bajo grado de deformación es un factor positivo para el desarrollo de los reservorios no convencionales. De cualquier manera, es necesario realizar estudios de mayor detalle para confirmar esta observación.

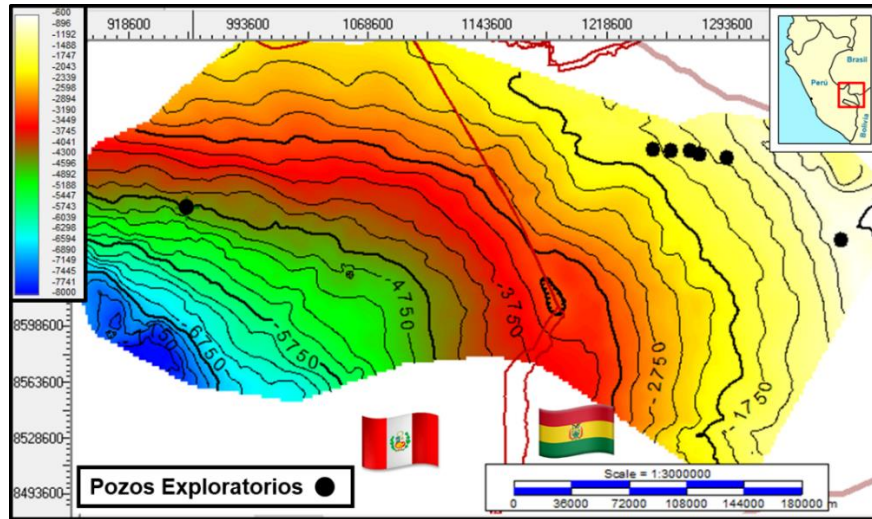


Figura 13. Mapa de soterramiento en metros bajo el nivel del mar para el Devónico Superior. Se observa el bajo grado de estructuración para el sector de antepaís y el aumento de espesor y profundidad hacia el SO.

A partir de los mapas estructurales y la topografía se realizaron mapas de soterramiento para las diferentes unidades. El mapa de soterramiento a la base del Devónico Superior (Figura 13) muestra que los pozos bolivianos están a una profundidad de entre 1500 y 1800 m, de allí, hacia el SO la profundidad aumenta llegando a valores de 7500 m cercanos al frente de deformación. El pozo Los Amigos x-2 atravesó toda la sección del Devónico Superior a los 4500 m. El mapa de soterramiento muestra que, en el lado boliviano, la mayor parte de los niveles de interés se encuentra por encima de los 3.500 m, un límite técnico-arbitrario para el desarrollo no convencional con pozos horizontales.

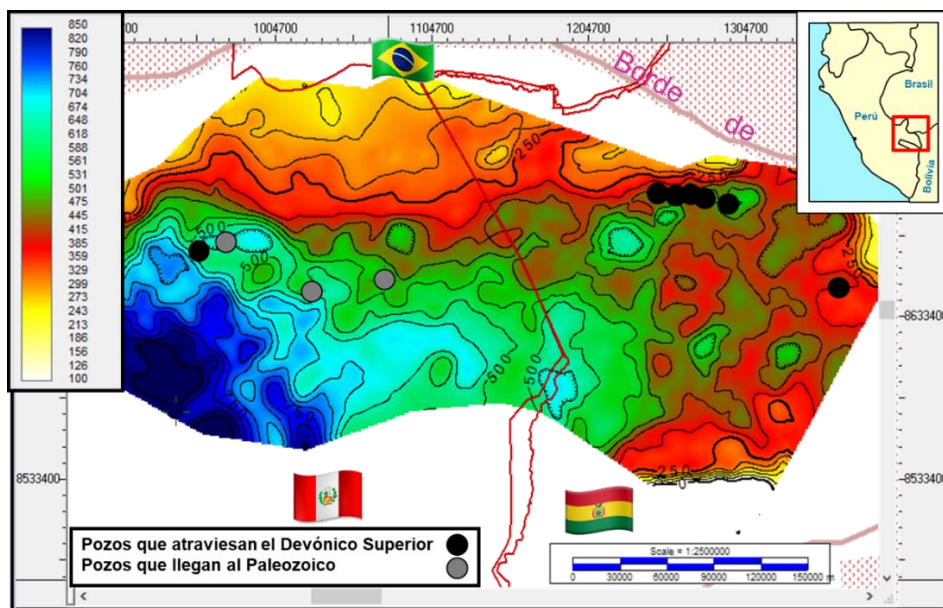


Figura 14. Mapa isopáquico en metros del Devónico Superior. Se observa un marcado aumento del espesor hacia el SO en la cuenca.

El mapa isopáquico de la Fm. Tomachi (Figura 14) muestra que los pozos del lado peruano y boliviano atravesaron secciones de un

espesor similar (levemente mayor en los pozos peruanos) y que el espesor de la sección disminuye hacia el N (borde de cuenca). En el mismo mapa se observa que el espesor aumenta hacia el sur formando una zona de mayor espesor de rumbo E-O, visible en Perú. Por otro lado, el mapa muestra que el espesor en la mayor parte del sector boliviano no sufre grandes variaciones manteniéndose entre los 500 y 300 m aproximadamente. El espesor aumenta considerablemente en el sector peruano hacia el SO

6) Infraestructura

La infraestructura, o la falta de ella, es uno de los temas críticos en esta cuenca si se piensa en un desarrollo No Convencional. La Falta de éxito en la exploración hidrocarburífera en ambos países no ayudó al desarrollo de la zona.

Desde el punto de vista de ductos e instalaciones petroleras, la zona de interés está lejos de las instalaciones más cercanas (Figura 15) en el caso de Perú hay unos 350 – 450 km promedio hasta el yacimiento Camisea desde donde salen una serie de ductos que transportan la producción de gas y petróleo hacia la costa donde se encuentran las refinerías. Existe, desde hace varios años un proyecto de construir un gasoducto que una Camisea con la costa de Arequipa “Gasoducto Sur Peruano”, pero su construcción está paralizada y su traza tampoco se acercaba demasiado a la zona de interés.

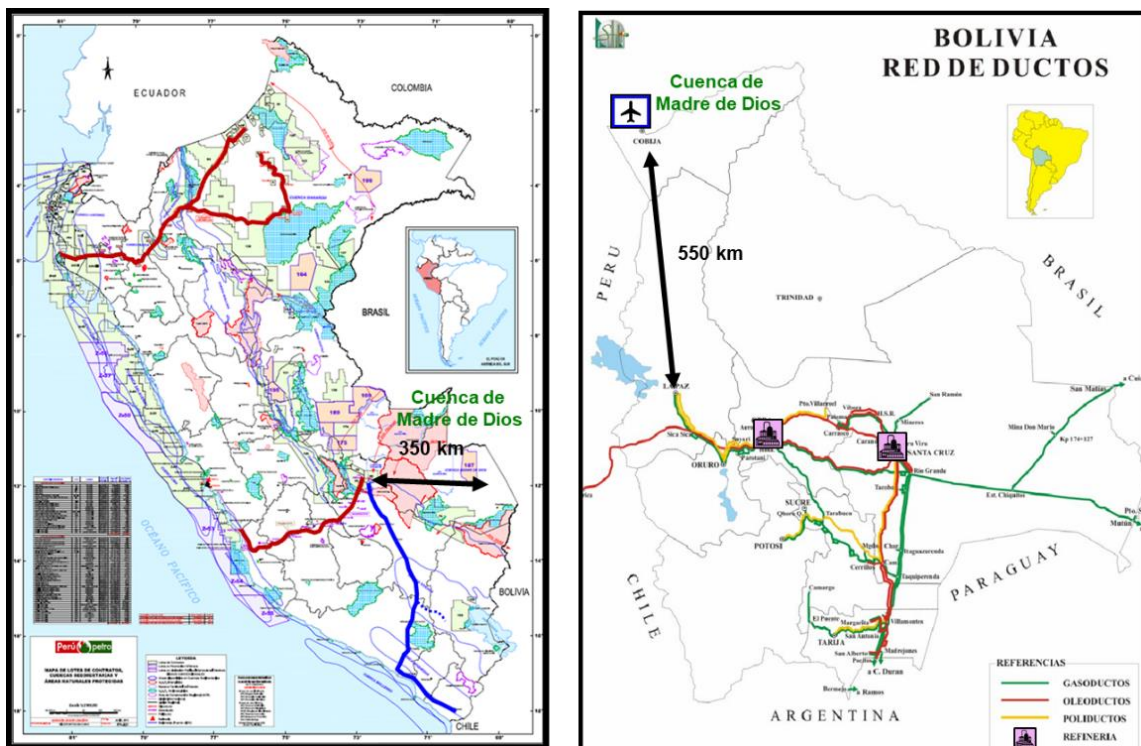


Figura 15. Izquierda: en rojo los ductos existentes en Perú y en azul la traza propuesta del gasoducto surperuano. Derecha ductos y refinerías existentes en Bolivia y su distancia hasta la Cuenca de Madre de Dios.

En el lado Boliviano la situación no es mucho mejor, Los ductos más cercanos se encuentran a unos 550 km al sur en la ciudad de La Paz y desde allí hay unos 380 km hasta la ciudad de Cochabamba donde YPFB Refinación S.A., una empresa boliviana que forma parte YPFB, posee la Refinería Gualberto Villarroel una de las dos refinerías más importantes de Bolivia.

Desde el punto de vista de la infraestructura vial (Figura 16), Perú lleva una ventaja: toda la zona de interés No Convencional está atravesada por una ruta internacional asfaltada “Carretera Transamazónica (30C)” que nace en las cercanías de Cusco, atraviesa toda la región de Madre de Dios y conecta con la ciudad de Assis en Brasil a través del “Puente de la Integración”.

La infraestructura vial en la parte Boliviana de Madre de Dios está mucho menos desarrollada, no existen rutas asfaltadas en toda la zona. Las arterias viales más importantes son las rutas Nacionales 16 y 18 que parten de la ciudad de Cobija, uno de las principales poblaciones en la zona.

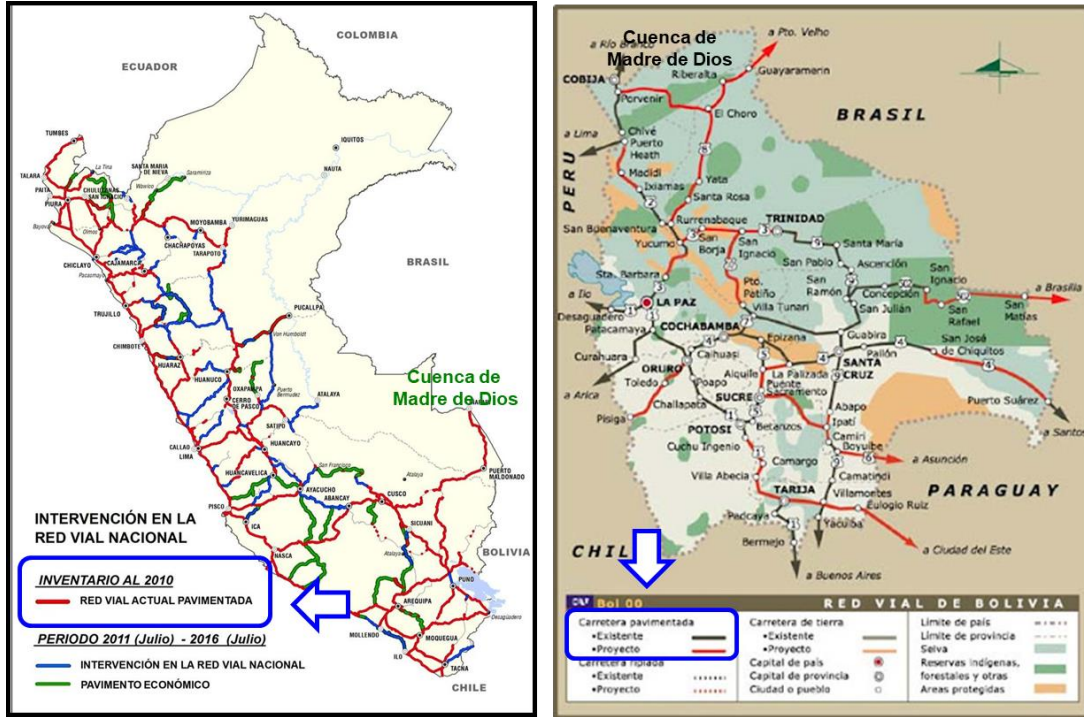


Figura 16. Izquierda Red Vial del Perú donde se observa que la carretera que atraviesa madre de Dios está asfaltada. Derecha: Red vial de Bolivia.

7) Restricciones medioambientales

La principal restricción medioambiental que enfrenta la cuenca de Madre de Dios es que está cubierta casi en su totalidad por la selva amazónica. Esto no significa necesariamente que se trate de áreas protegidas por los respectivos gobiernos, ya que son objetivo de diversas actividades ilegales que provocan una gran destrucción del medio ambiente como ser: la tala masiva de árboles y la explotación de oro. Sobre este último, un artículo del año 2019 estimaba que en Madre de Dios se producen entre 16.000 y 18.000 kg de oro al año, y por cada kg de oro extraído se utilizan unos 2'8 kg de mercurio, lo que supone que durante los últimos 20 años se han arrojado más de 3.000 toneladas de mercurio a los ríos amazónicos.

Adicionalmente se presenta el problema de la extracción de agua para satisfacer la gran demanda que necesita una explotación de este tipo.

En el caso de Bolivia, unos 7500 km² de la cuenca de Madre de Dios están cubiertos por la “Reserva Nacional de Vida Silvestre Amazónica Manuripi” que es un área protegida creada para proteger el ecosistema de bosque tropical húmedo amazónico, las cuencas hidrográficas, y la flora y fauna silvestre. (Figura 17)

En Perú no existen Parques Nacionales, Reservas Naturales dentro de la Cuenca de Madre de Dios. Si existe, desde hace varios años, el proyecto de crear una “Zona de Conservación” que abarcaría gran parte de la zona con interés No Convencional. (Figura 17, op. cit)

8) Situación legal

La actividad “No Convencional”, al contrario de lo que sucede en otros países de Latinoamérica, como Colombia, no esta suspendida o prohibida, ni en Bolivia ni en Perú.

En Perú, el Play No Convencional no ha suscitado históricamente un interés concreto por parte de las empresas petroleras, las “cocinas” de las principales cuencas productivas: Ucayali y Marañón, se encuentran a una profundidad demasiado elevada (> 4.500 m) como para tener interés para desarrollar este tipo de Yacimientos. En la última década, se han publicado algunos trabajos analizando el potencial que podrían tener distintas unidades pero no ha habido intentos concretos por parte de una empresa privada.

En Bolivia, el panorama es algo diferente. En la Cuenca de Chaco, la F. Los Monos, ha sido estudiada en algunos lugares donde no esta demasiado estructurada. La mayor incertidumbre parece estar ligada a la riqueza de la Roca Madre y el tipo de fluido: TOC < 2 % y

¿gas prone? (Veizaga- Saavedra et al 2014 ²⁵). Otro posible problema podría ser la intercalación de niveles reservorios (areniscas) que estén saturados de agua. Recientemente la empresa estatal boliviana YPFB, esta empezando a estudiar el No Convencional de Madre de Dios, perforando un sondeo en el año 2021 (Gomero x-1), planificando otro sondeo a la brevedad y modificando las áreas de los bloques de la cuenca (haciéndolos mas grandes) para que sean atractivos para el desarrollo de la actividad no Convencional

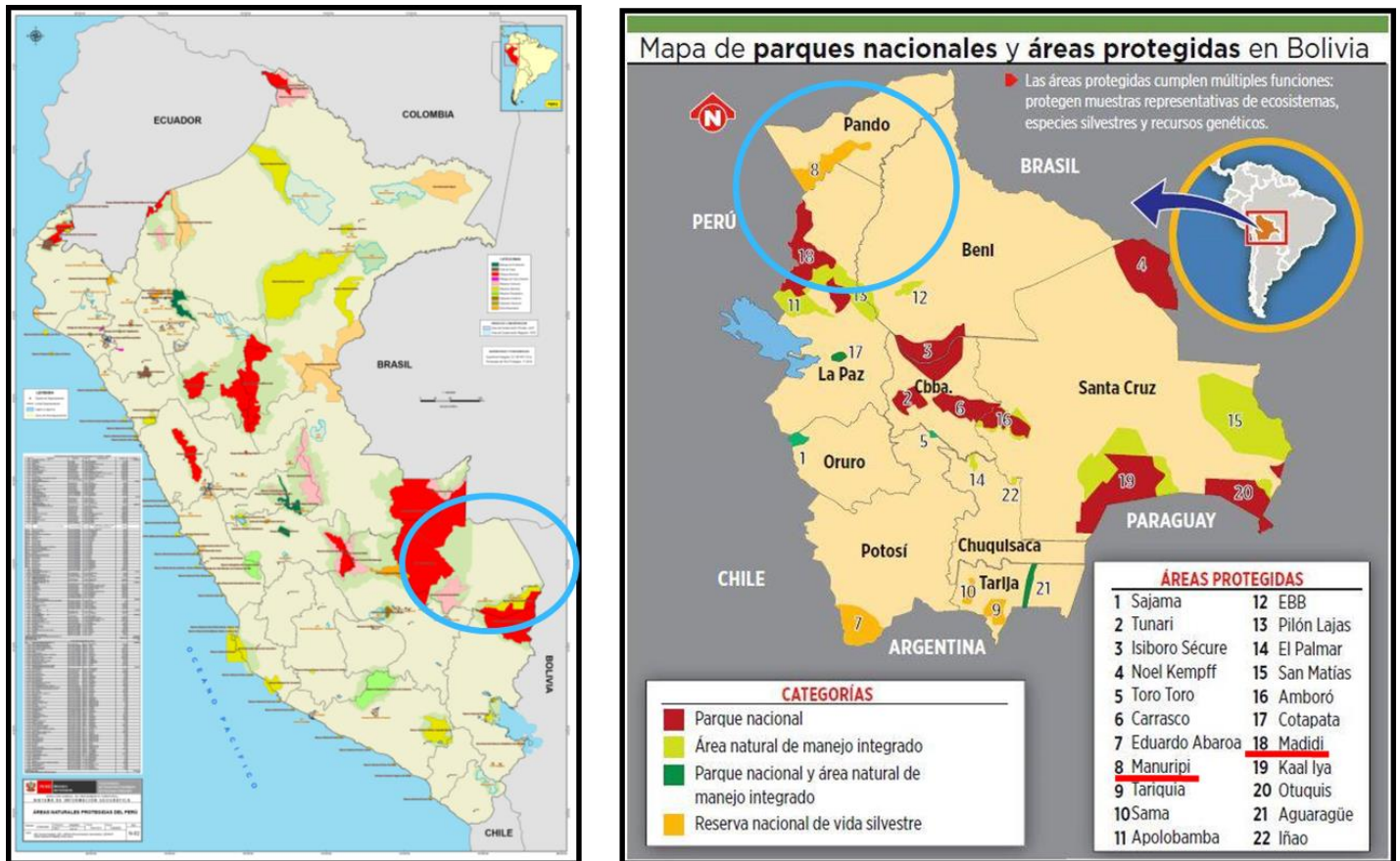


Figura 17. Izquierda: Mapa de Reservas y Zonas Naturales protegidas de Perú. Derecha Mapa de Parques Naturales y Zonas protegidas de Bolivia.

DISCUSIÓN - ELABORACION DE UN MODELO DE FACIES CONCEPTUAL

Como se mostró en las secciones anteriores, el pozo Los Amigos x-2, ubicado en el sector peruano de la cuenca, atravesó la totalidad de la secuencia del Devónico Superior. Sin embargo, los niveles orgánicos descritos en este pozo son de regular calidad en comparación con la excelente calidad de roca madre que se observa en los pozos bolivianos. El objetivo de esta sección es brindar un hipótesis, tomando en cuenta los datos presentados, que permita explicar las diferencias observadas en los distintos sectores de la cuenca.

En base a la similitud de los registros paleontológicos, el Devónico de Sudamérica estaría formado por cuencas intracratónicas interconectadas entre sí (Grahn, 2005 ²⁶; Di Pasquo *et al.*, 2009 ²⁷). Estas cuencas se encontraban rodeando altos de basamento (Wood, 1995 ²⁸). y durante el Devónico depositaron rocas de ambiente marino (Figura 18). Cabe destacar que en muchas de estas cuencas se depositaron, para este período, rocas madres generadoras comprobadas de hidrocarburos (p.e. Los Monos en la Cuenca de Tarija, Parnaíba en la Cuenca de Solimoes y Cabanillas-Tomachi en Madre de Dios).

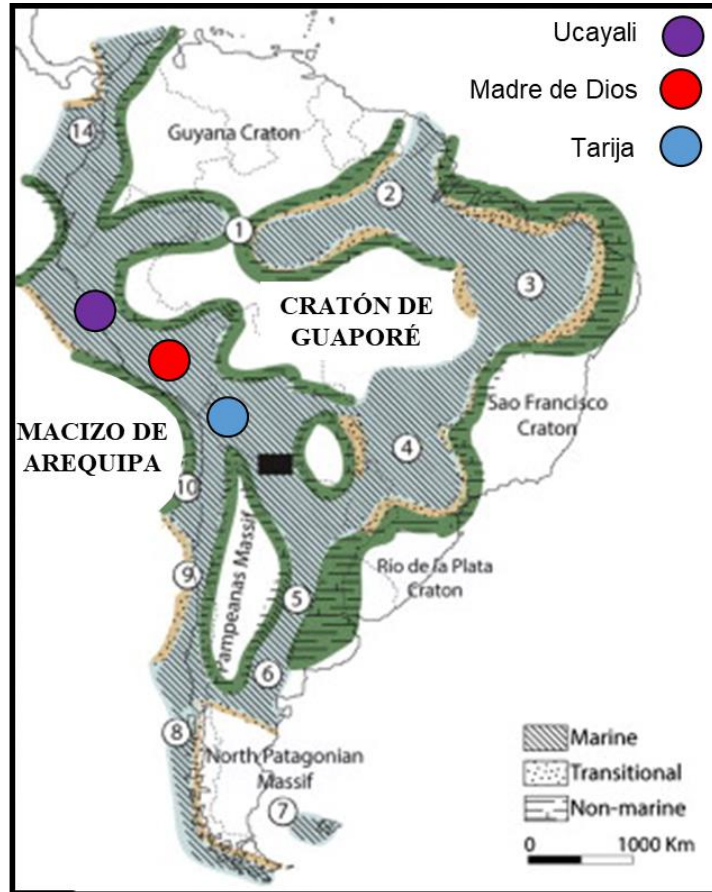


Figura 18: Cuencas Devónicas de Sudamérica donde se observa la conexión entre las mismas, rodeando núcleos de basamento. Modificado de Noetinger (2015²⁹).

En el caso de Madre de Dios la cuenca tendría dos zonas de aporte principales: desde el E el Cratón de Guaporé y desde el W el Macizo de Arequipa (Issacson, 1974 op. cit. ; Giusiano *et al.*, 1998 op. cit.). Esto indicaría que hacia el N y el S la cuenca estaría abierta, conectada con la Cuenca de Ucayali y la Cuenca de Tarija, respectivamente. Esta conexión en sentido N-S o NW-SE podría haber promovido la circulación marina en ese sentido favoreciendo la distribución de partículas y la disponibilidad de oxígeno en el fondo marino. El sondeo Los Amigos x-2 se ubicaría en una zona distal relativa en la Cuenca de Madre de Dios y esa circulación marina podría haber modificado las condiciones de depositación instalando un ambiente relativamente más rico en oxígeno en esa parte de la cuenca, la presencia de acritarcas soportan esta interpretación. En base a esta hipótesis se podría explicar los menores valores de COT encontrados en el pozo Los Amigos (Figura 19).

Proponemos que durante la máxima inundación del Frasniano, en la Cuenca de Madre de Dios se formó un engolfamiento sobre el cratón de Guaporé conectado hacia el SO con el mar abierto. En este engolfamiento la circulación aguas restringidas favoreció el desarrollo de un ambiente anóxico y/o euxínico que promovió la preservación de la materia orgánica en el sector boliviano. Es por eso que hacia la zona de mar abierto (sector peruano) la preservación de materia orgánica fue menor. En base a esta hipótesis se construyó el mapa conceptual de facies de la Figura 12 delimitando de manera conceptual los límites de la zona restringida para el Frasniano donde se habría desarrollado un ambiente de mayor anoxia y, por ende, con mayor potencial para la preservación de la materia orgánica.

ESTIMACION DEL TAMAÑO DEL PLAY - CÁLCULO DE RECURSOS “IN PLACE”

En base a lo expresado en todos los puntos anteriores se puede intentar estimar un tamaño del Play en toda la cuenca para poder calcular unos Recursos “*in place*” ya que no se conoce el Factor de Recobro que podría tener este reservorio. Este ejercicio es meramente especulativo, y no tiene más objeto que poder tener una idea muy aproximada del rango de tamaños que podría tener la acumulación. Para poder realizar este ejercicio, la falta de datos duros obliga a realizar una serie de asunciones:

- Se asume un aumento de la madurez hacia las zonas más profundas de la cuenca desde lo niveles ricos en TOC perforados en el sector

boliviano de la cuenca. Como una guía, se utiliza el mapa publicado por Peters et al. (1997, op. cit) que integra la información disponible en los sectores peruano y boliviano.

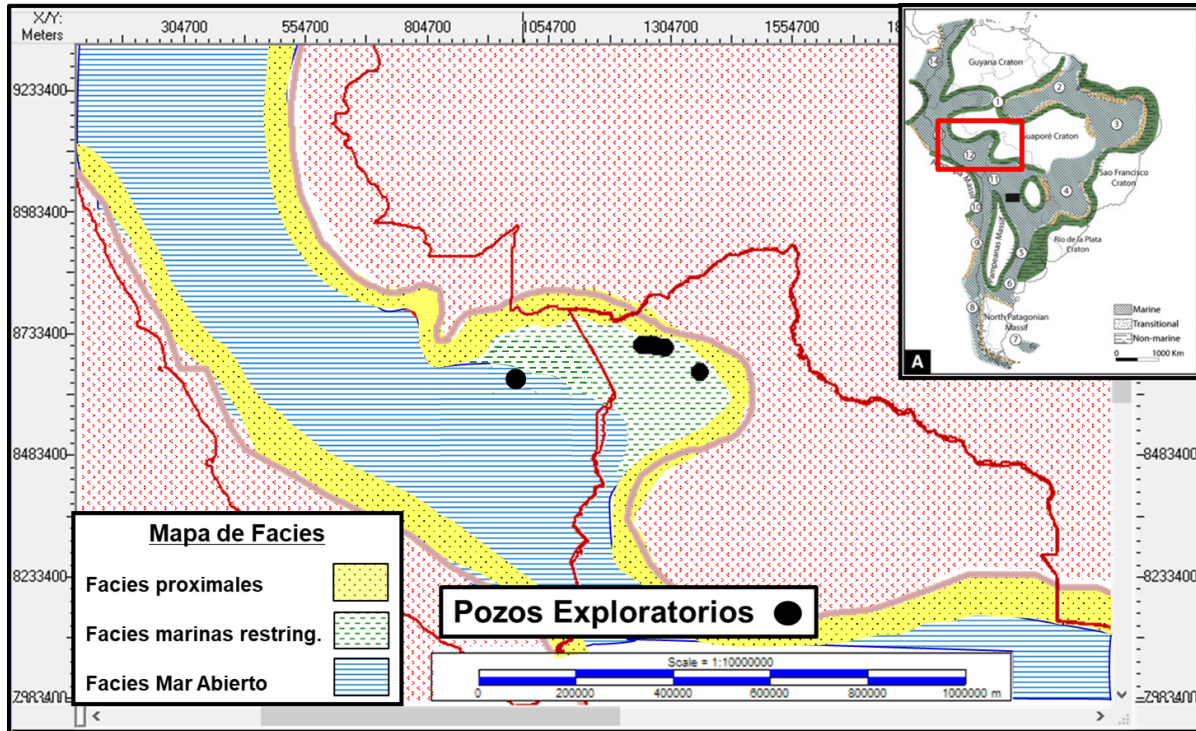


Figura 19. Mapa conceptual de facies para el Frasniano en base a la información de pozos y contexto regional.

-Se toma un rango prospectable de profundidades que va desde los pozos ubicados en territorio boliviano y una profundidad máxima de 3500 m, valor arbitrario relacionado a una profundidad máxima para un desarrollo no convencional.

- De acuerdo a los dos parámetros anteriores, la zona prospectable se encontraría en ventana de petróleo, ya que la zona de gas se encuentra a una profundidad técnicamente inviable de desarrollar en la actualidad.

- La ausencia de niveles ricos en TOC en el pozo Los Amigos -2X se explica a partir del mapa conceptual de distribución de facies (Figura 12) el cual sirve como modelo para explicar las variaciones faciales encontradas en los pozos del lado peruano y boliviano. Este mapa, dibujado arbitrariamente, delimita una zona restringida dentro de la cuenca, ubicada mayoritariamente en el sector boliviano como más favorable para la depositación y preservación de materia orgánica.

- Asumo que tengo al menos un nivel de navegación continuo en toda la cuenca de al menos 30 m de espesor.

- No se realizan limitaciones de superficie debido a condiciones estructurales (presencia de zonas falladas plegadas), presencia de zonas cultivadas y/o comunidades y restricciones mediambientales de diverso tipo; dentro de esto último se encuentra la ya mencionada “Reserva Nacional de Vida Silvestre Amazónica Manuripi” en Bolivia que posee una superficie de 4500 km².

La integración de todas estas asunciones (Figura 20) da como resultado un área prospectable de 33000 km², el equivalente de toda la cuenca neuquina en Argentina, con un total de recursos “in place” asciende a 260 MMMBBL de petróleo.

CONCLUSIONES GENERALES

La cuenca Madre de Dios muestra un interesante potencial como reservorio No Convencional de petróleo en rocas de edad Devónica inferior pertenecientes a la F. Tomachi en un área que podría tener la superficie de la Cuenca neuquina en la Argentina.

Este Play, se desarrollaría tanto en la zona peruana como boliviana de la cuenca y todavía no ha sido probado. Para confirmar el potencial de esta unidad se deberían perforar sondeos exploratorios que permitan comprobar la madurez de la roca madre en sectores más profundos que los atravesados por los pozos del sector boliviano. Adicionalmente la profundidad a la cual se investigue el reservorio, en principio, no debería superar los 3.500 m máximo el cual es un límite informal aproximado de economicidad que se maneja en la industria.

Un pozo exploratorio

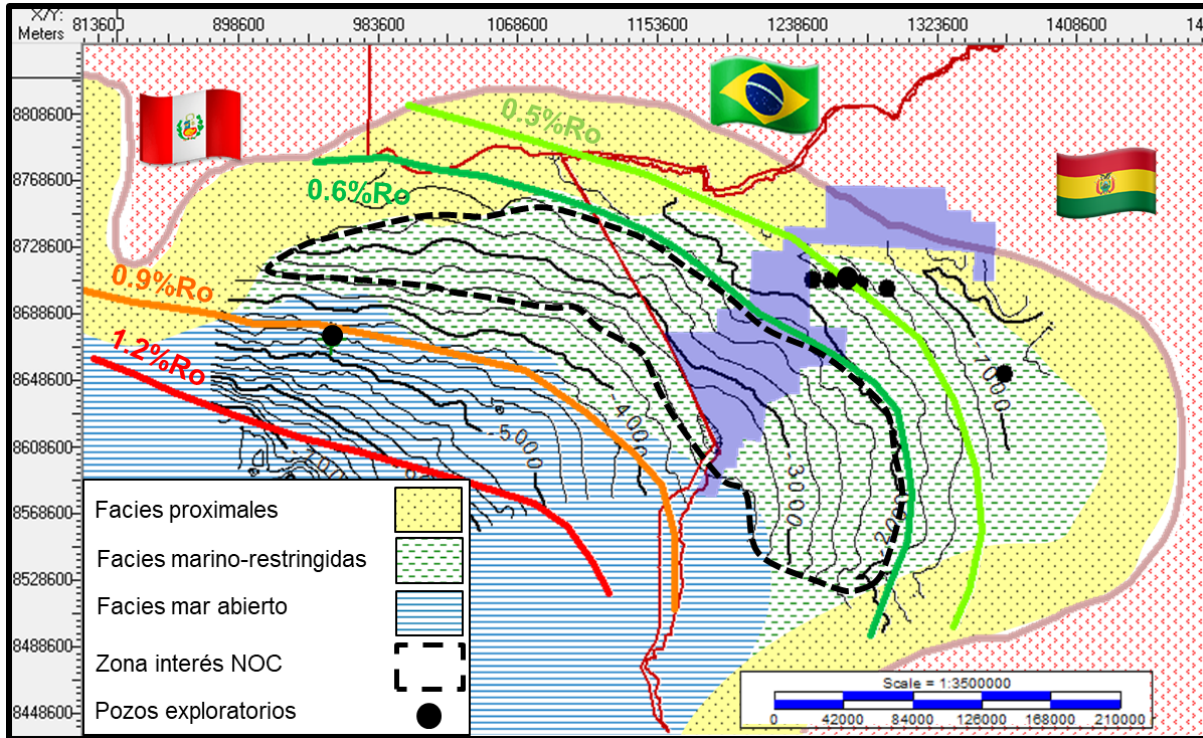


Figura 20. Play concept map para la el Devónico Superior de Madre de Dios. Polígono azul semitransparente corresponde a la reserva natural Manuripi.

, además de comprobar la madurez de la roca madre y empezar a delinear una zona prospectiva también debería poder comprobar productividad mediante un ensayo al menos de pequeña magnitud. También se debería evaluar la posibilidad de perforar un pozo horizontal para comparar diferencias de productividad con un ensayo prolongado.

Queda claro que, con el nivel actual de conocimientos, el sector boliviano es el más prometedor ya que aquí se encuentran los pozos donde se encontraron los niveles ricos en TOC aunque sin la madurez adecuada para la generación de hidrocarburos. La zona de interés en Perú surge a partir de la extrapolación de los datos de Bolivia y la elaboración de un modelo conceptual de facies, no probado, que permite relacionar los pozos del lado boliviano con el único pozo del sector peruano que atravesó facies de la misma edad.

A todas estas consideraciones geológicas deben sumarse el resto de las consideraciones tratadas en este trabajo. La cuenca tiene varias restricciones importante; tal vez la más importante sea la medioambiental ya que la mayor parte de la cuenca se encuentra cubierta por la selva amazónica. A esto debe sumarse, en ambos países, la ausencia de instalaciones de superficies; la lejanía de ductos y plantas de tratamiento de hidrocarburos ; la ausencia de infraestructura vial en Bolivia, etc. Por último está el tema legal, ya que, si bien esta actividad no esta prohibida, al no haber explotaciones de este tipo de yacimientos no se sabe las repercusiones que tendría una exploración de este tipo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores del presente trabajo agradecen a las autoridades de Tecpetrol (Lic. Daniel Valencio e Ing Horacio Marín) el permiso para la publicación del presente trabajo. A Ailín Lopasso y Alan Buchanan por la ayuda brindada en la visualización de la geoquímica orgánica.

Referencias

1. Peters, K. E., Wagner, J. B., Carpenter, D. G. y Conrad, K. T. 1997, World class Devonian potential seen in eastern Madre de Dios Basin. Oil & Gas Journal, v. 95, no. 7, p. 61–65.
2. Timoteo, D. 2015. Potential Shale Plays in Sub-Andean Basins of Perú. AAPG Annual Convention & Exhibition 2015. Search and Discovery Article #80450. 7p.
3. Schneider, F., Rousse, S., Faure, J., Lemgruber, A., Gutierrez, G., Pareja, J. y Padilla, O. 2018. Hydrocarbon potential of the eastern

- Madre de Dios Basin, Bolivia. En G. Zamora, K. R. McClay, and V. A. Ramos, eds. Petroleum basins and hydrocarbon potential of the Andes of Peru and Bolivia: AAPG Memoir 117, p. 413–442.
4. House, N., Carpenter, D., Cunningham, P. y Berumen, M. 1999. Influence of Paleozoic arches on structural style and stratigraphic in the Madre de Dios Basin in southern Peru and northern Bolivia. INGEPET '99-Exploration and Exploration of Petroleum and Gas, Lima, Peru, 8 p.
 5. Alemán, A. M., y León, W. 2008. Petroleum systems of the Madre de Dios Basin and its associated fold and thrust belt: Perú and Bolivia. En C. E. Cruz, J. F. Rodríguez, J. J. Hechem, and H. J. Villar, eds., *Sistemas Petroleros de las Cuencas Andinas*, p. 211–236.
 6. Mobil, 1993, Madre de Dios Block Wells (Bolivia): Stratigraphic and source rock data and interpretation, reporte inédito, 64 p.
 7. Alemán, A. M., Valasek, D., Ardiles, C., Wood, G. D., Wahlman, G. P. y Groves, J. R. 2003. Petroleum Systems and Tectono-Stratigraphic Evolution of the Madre de Dios Basin and its Associated Thrustbelt in Perú and Bolivia, VIII Simposio Bolivariano “Exploración Petrolera de las Cuencas Subandinas”, p. 177–200.
 8. Issacson, P. 1974. Evidence for a Western Extracontinental Land Source during the Devonian Period in the Central Andes. *Geological Society of America Bulletin*, v. 86, p. 39-46.
 9. Newell, N. D., Chronic J. y Roberts, T. 1953. Upper Paleozoic of Peru. *Geological Society of America Memoir* 58, 276p.
 10. Cocks L.R.M. 2005 - ““Silurian - Encyclopedia of Geology”. Editors-in-Chief: R C. Selley, L. R. M. Cocks and I R. Plimer.
 11. Caputo M., & Dos Santos R. 2019. “Stratigraphy and ages of four Early Silurian through Late Devonian, Early and Middle Mississippian glaciation events in the Parnaíba Basin and adjacent areas, NE Brazil”. Vol 207. *Earth-Science Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.103002>
 12. Schneider, F., Faure J. L., Gutierrez, J., Lemgruber, A., Rouse, S. y Padilla, O. 2016. Evaluación del Sistema Petrolífero de la Cuenca de Madre de Dios de Bolivia. XII Simposio Bolivariano. Bogotá. Colombia.
 13. Baby, P., Hermoza, W., Navarro, L., Bolaños, R., Convenio Perupetro-IRD; Espurt, N., Roddaz, M., Brusset, S., LMTG, Univ. Toulouse, Francia; Gil, W., Repsol-IPF, Ecuador, 2005. Geodinámica Mio-Pliocena de las cuencas subandinas peruanas: un mejor entendimiento de los sistemas petroleros. INGEPET 2005 EXPR-3-PB-20, Lima, 14 pp.
 14. Uba, C. E., Strecker, M.R., and Schmidt, A. K. 2006, Increased sediment accumulation rates and climatic forcing in the central Andes during the late Miocene. *Geology*, v. 35, no. 11, p. 979–982.
 15. PeruPetro, 2002. Madre de Dios Basin Technical Report. Reporte Inédito. 39p
 16. Over, D. J., de la Rue, S., Isaacson, P. y Ellwood, B. 2009. Upper Devonian conodonts from black shales of the high latitude Tomachi Formation, Madre de Dios Basin, northern Bolivia. *Palaeontographica Americana*, v. 62, p. 89–99.
 17. Jarvie, D., Jarvie, B., Courson, D., Garza, T. Jarvie, J. y Rocher, D. 2011, *Geochemical Tools for Assessment of Tight Oil Reservoirs: AAPG Search and Discovery Article #90122*.
 18. Joachimski, M y Buggisch, W. 1993. Anoxic events in the Late Frasnian-Causes of the Frasnian-Famennian faunal crisis? *Geology*, v.21, p 675-678.
 19. Giusiano, A., Diaz, E. and Isaacson, P. 1998. Composición y procedencia de areniscas del Devónico medio-Carbonífero superior de la Cuenca Madre de Dios, Bolivia: Pozo Manuripi x-1, *Revista de la Asociación Argentina de Sedimentología*, v 5, 1-8.
 20. Mobil y PeruPetro, 1995, Madre de Dios Basin, technical evaluation agreement Final Report, reporte inédito, 59 p.
 21. Veiga, R., Bande, A., Micucci, C., Mosquera, A. y Macellari, C., 2018. Análisis en la capacidad de almacenamiento de gas a partir del uso de registros de pozo. Ejemplos en la Formación Vaca Muerta. Cuenca Neuquina. Argentina. Simposio de Recursos No Convencionales. X Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos.
 22. Veiga, R., Vergani, G.D., Brissón, I.E., Macellari, C.E. and Leanza, H. A., 2020. The Neuquén Super Basin. *American Association Petroleum Geologist Bulletin*, v.104, N° 12, 2521-2555.
 23. Hermoza, W., 2004. Dynamique tectono-sédimentaire et restauration séquentielle du retro- bassin d'avant-pays des Andes centrales. Thèse

de l'Université Paul Sabatier de Toulouse III, 296 p. (version en español).

24. Sempere, T., Herail, G., Oller, J. y Bonhomme, M.G. 1990. Late Oligocene-early Miocene major tectonic crisis and related basins in Bolivia. *Geology*, v.18, p.946–949.
25. Veizaga-Saavedra, J., Poiré, D. G., Vergani, G., Salfity, J., 2014. “Formación Los Monos (Devónico), Cuenca de Tarija: aproximación geoquímica y mineralógica del potencial como shale gas y shale oil”. IX Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos. Simposio de Recursos No Convencionales. Mar del Plata . Argentina.
26. Grahn, Y. 2005. Devonian chitinozoan biozones of Western Gondwana. *Acta Geologica Polonica*, 55, 211–227.
27. Di Pasquo, M. 2009. The Pennsylvanian palynoflora of the Pando X-1 Borehole, northern Bolivia: Review of Palaeobotany and Palynology, v. 157, p.266–284.
28. Wood, G. D. 1995. The Gondwanan Acritarch *Bimerga bensonii* gen. et sp. nov.: Paleogeographic and biostratigraphic importance in the Devonian Malvinokaffric
29. Noetinger, S. 2015. Spore diversity trends in the Middle Devonian of the Chaco-Salteño Plain, northwestern Argentina. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 417, 151-163.