

CONTRIBUCIÓN A LA EVALUACIÓN DEL POTENCIAL PETROLÍFERO DEL SUBANDINO SUR DE BOLIVIA

Schneider Frederic¹, Constantini Luis¹, Mayta Raul², Stephane Rousse¹, Javier Esquivel²

1: BeicipFranlab, frederic.schneider@beicip.com, lconstantini.arg@gmail.com, stephane.rousse@beicip.com

2: YPFB, rmaytaj@ypfb.gob.bo, jresquivel@ypfb.gob.bo

Palabras clave: Bolivia, Subandino Sur, Sistema Petrolero, Carga Petrolífera, Recursos

ABSTRACT

The thrust-and-fault belt of the southern Subandean of Bolivia is a mature exploratory area (~300 km²/exploratory well) even if the deep mega play (older than Los Monos Formation) is still an intermediate exploratory area (~800 km²/exploratory well). The analysis of the existing fields of the area shows that most of them are not filled up to their spill point. This is mainly due to charge limitation related to the geological history.

In order to reduce uncertainties and risk during prospect assessment, a geological synthesis of Bolivia has been carried out. One of the outputs of this study is a better understanding of the sedimentary architecture and especially the source rock distribution, even if more works are needed to fully characterize them.

The thermal calibrations associated with geological data indicate the existence of a thermal event that took place at the end of the Triassic. As a consequence, the geochemical models calculate two expulsion pulses. The most important one occurred at the end of the Triassic - Early Jurassic. The second pulse, related to the Andean tectonics, can be subdivided locally into two phases: a phase previous to deformation during foreland sedimentation and another phase associated with sedimentation and erosion during deformation.

During the last "tectonic" phase, traps may be charged with hydrocarbons expelled from the synclines and from the anticlines. The expulsion mechanisms in the synclines are mechanical compaction and sometime increase of maturity if sedimentation occurred during deformation. In the anticlines, depressurization during uplift is the main mechanism which originates expulsion.

A specific methodology has been developed in order to assess the charge of a given trap. Charge is computed as the product of the fetch area (FA), the remaining potential (SPI) of the source rock at the age (Age) of the trap formation, and the efficiency ratio (PSY). The last factor is calibrated with the existing fields. The SPI is evaluated through 1D geochemical modeling calibrated through a red of more than 200 wells.

The occurrence of the main expulsion phase at the end of the Triassic (o beg Jurassic) could open the exploration of Southern Bolivia to new plays such as the Paleozoic pinch out on the basement or stratigraphic traps within the Carboniferous glacial deposits. Other conceptual plays could be considered looking for structural traps older than Jurassic.

INTRODUCCIÓN

El Subandino de Bolivia es una compleja faja plegada y corrida (e.g. Roeder 1988; Baby *et*

al 1989; Jaillard *et al* 2000), que constituye el margen Oriental del dominio Andino Central. Su límite Oriental es el Cabalgamiento Frontal Principal (CFP), conformando el límite estructural entre Subandino y Llanura Chaqueña hacia el Este. La deformación se inició durante el Oligoceno (al Oeste, límite con Cordillera Oriental) y aún está activa. El material involucrado en esta deformación va desde el Ordovícico hasta el Cuaternario, con un relleno de ante-fosa (foredeep) de edad Oligoceno Tardío-Reciente. La serie sedimentaria pre-orogénica muestra variaciones de facies y de espesor, las cuales juegan un importante papel en el control de la geometría estructural.

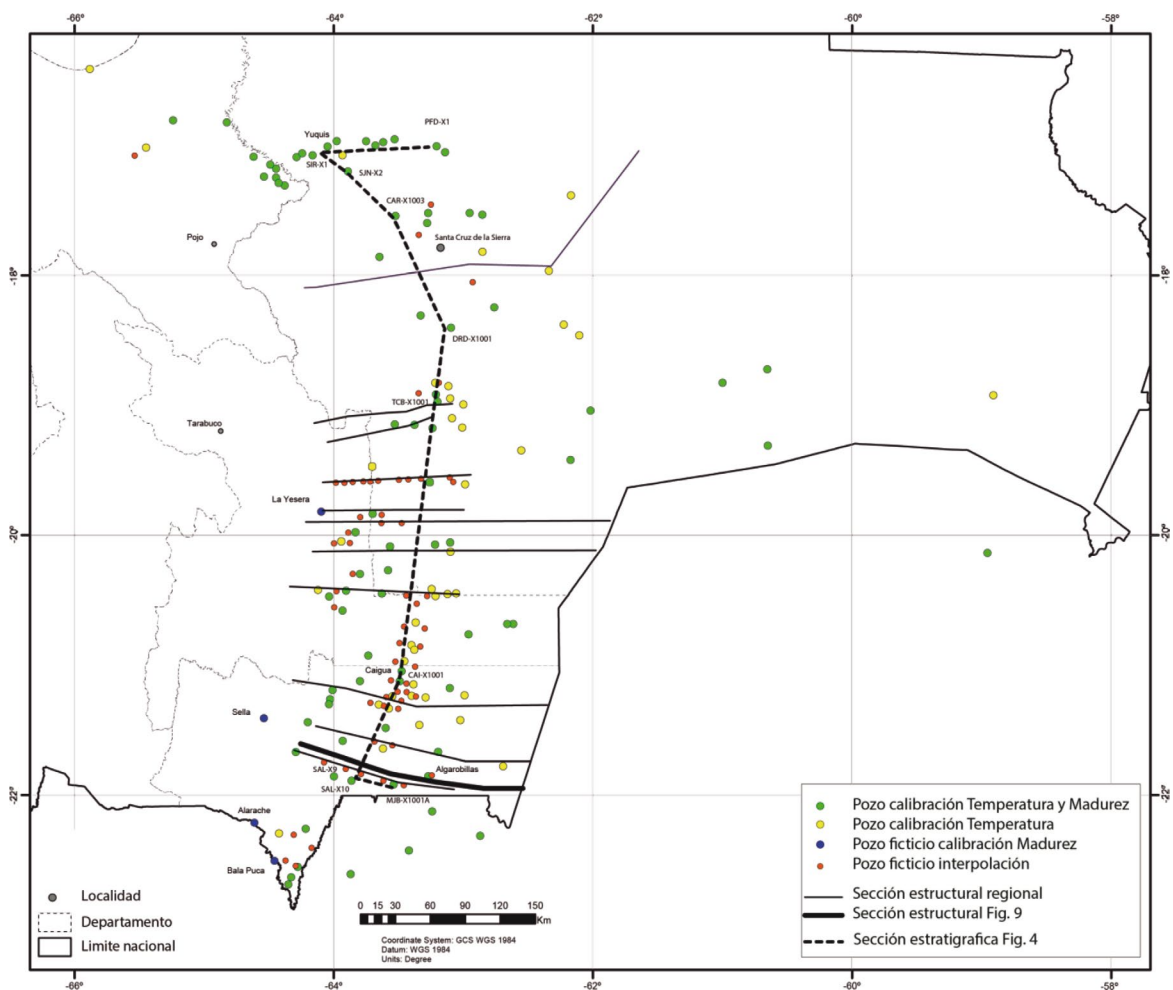


Figura 1. Definición de la zona de estudio incluyendo la ubicación de las secciones estructurales regionales. También, se muestra la ubicación de los pozos y pozos ficticios que fueron calibrados con modelo geoquímico 1D. En amarillo los pozos calibrados con datos de temperatura y en verde los sondeos calibrados con datos de temperatura y madurez (Ro y/o IAT). En azul los perfiles estratigráficos de campo con datos de madurez transformadas en pozos ficticios. En naranja los pozos ficticios ubicados en los sinclinales.

El Subandino Sur se puede considerar como una zona casi madura para la exploración hidrocarburífera, con un promedio de 300 km² por pozo de exploración, por lo cual es la segunda zona más madura de toda Bolivia, después del Piedemonte (100 km² por pozo de exploración).

Esta zona es productora desde 1924 con el descubrimiento del campo Bermejo, seguido del descubrimiento del campo Buena Vista. A la fecha, en esta región hay 26 campos de hidrocarburos.

Según la evaluación de las reservas de 2009, el Subandino Sur y su Piedemonte (que incluye la zona del Boomerang) alojan el 71.8% y 27.5%, respectivamente, de los volúmenes originales recuperables probados de Bolivia. La Figura 2 muestra que 71% de los volúmenes originales in place están en el Devónico (54% se alojan en la formación Huamampampa). Esa distribución confirma, en cierta manera, que el Devónico medio-superior (Fm Los Monos) actúa como un sello eficiente, definiendo en el Sur de Bolivia dos “mega-plays”:

- Un mega-play Ante Los Monos (ALM) con reservorios del Devónico inferior y medio (Fms Huamampampa, Icla y Santa Rosa) y Silúrico (Fms El Carmen y Tarabuco), alimentados por las rocas madre del Devónico inferior y del Silúrico.
- Un mega-play Post Los Monos (PLM) con reservorios desde el Devónico superior hasta el Mioceno, alimentados principalmente por la roca madre del Devónico medio (Fm. Los Monos).

No se puede descartar una alimentación parcial per descensum del play ALM desde la parte inferior de la formación Los Monos. Tampoco se puede descartar la posibilidad de alimentar los reservorios del play PLM desde las rocas madre del play ALM favorecido por el sistema de fallas.

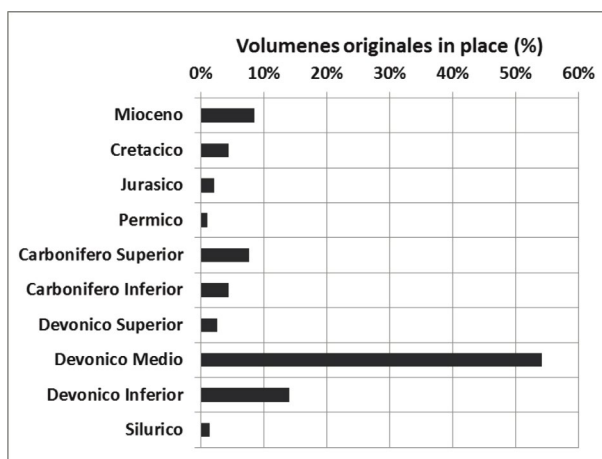


Figura 2. Distribución relativa de los volúmenes originales in place por niveles crono-estratigráfico para Bolivia. Los datos provienen de Ryder Scott (2009).

El análisis de los campos existentes muestra que muy pocos están llenos hasta su punto de fuga. Es muy difícil predecir cuál sería el llenado de una estructura una vez conocida la trampa y el reservorio. El objetivo de este trabajo es proporcionar una metodología que permita evaluar el llenado de una estructura una vez que los otros parámetros (trampa, reservorio, sello) son conocidos.

Para reducir las incertidumbres y disminuir los riesgos, se empezó con una síntesis regional que cubre toda Bolivia. Esta síntesis contempla un estudio estratigráfico que incluye las rocas

madre potenciales, un estudio regional de la deformación y la evaluación del sistema petrolífero. En este trabajo se presentaran algunos resultados de este estudio regional para la parte Sur de Bolivia.

ANTECEDENTES

El análisis, parcial a la fecha, de los campos muestra que pocos se pueden considerar como llenos hasta el punto de fuga. Por ejemplo, el campo Caigua es productor en las formaciones Huamampampa, Icla y Santa Rosa. Las columnas iniciales de hidrocarburos se evalúan cercanas a 90 m, 150 m y 150 m mientras los cierres verticales interpretados se aproximan a 140 m, 350 m y 430 m, respectivamente como se indica en el estudio de Ryder Scott (2009).

Algunas estructuras perforadas mostraron la existencia de acumulaciones demasiado pequeñas para ser consideradas como económicas. Por ejemplo, la estructura Yuquis, ubicada en la zona del Boomerang (Piedemonte) encontró gas con una columna de aproximadamente 20 m aunque tiene un cierre vertical superior a 60 m. En este caso, se puede mostrar que la zona de drenaje de la estructura es muy reducida y como consecuencia la carga hidrocarburífera de la estructura fue muy limitada (Beicip, 2017).

Igualmente, la estructura Algarrobillas ubicada en el sur del Piedemonte, presenta una acumulación de hidrocarburos que cubre una superficie inferior a 0.5 km² mientras el cierre estructural es superior a 7 km². Es este caso es muy probable que el llenado parcial sea debido al hecho que la estructura es muy joven por ser ubicada en el piedemonte.

MODELO ESTÁTICO

Estratigrafía regional

Cuatro ciclos tectono-sedimentarios son reconocidos en Bolivia: Tascara, Cordillera, Sub-Andino y Andino (Lohman, 1970). Esos ciclos se pueden subdividir en 8 súper-secuencias (Sempere, 1990, 1995). El ciclo Cordillera de edad Silúrico y Devónico abarca las rocas madres conocidas e inferidas. Los niveles productores se encuentran en casi toda la columna sedimentaria (ver Fig 3).

Utilizando los análisis bioestratigráficos existentes en los pozos de la zona de estudio, se estableció un modelo estratigráfico y secuencial (basado en los conceptos de la estratigrafía secuencial) con el fin de definir las principales superficies estratigráficas a propagar entre los pozos (Limite de Secuencia, Superficie Transgresiva, Superficie de Inundación Máxima, Superficie de Erosión Glaciar). Este trabajo esta descrito con detalle en Beicip-Franlab (2018). La Figura 4 es un ejemplo de la columna estratigráfica compuesta en la cual se muestra la definición de las

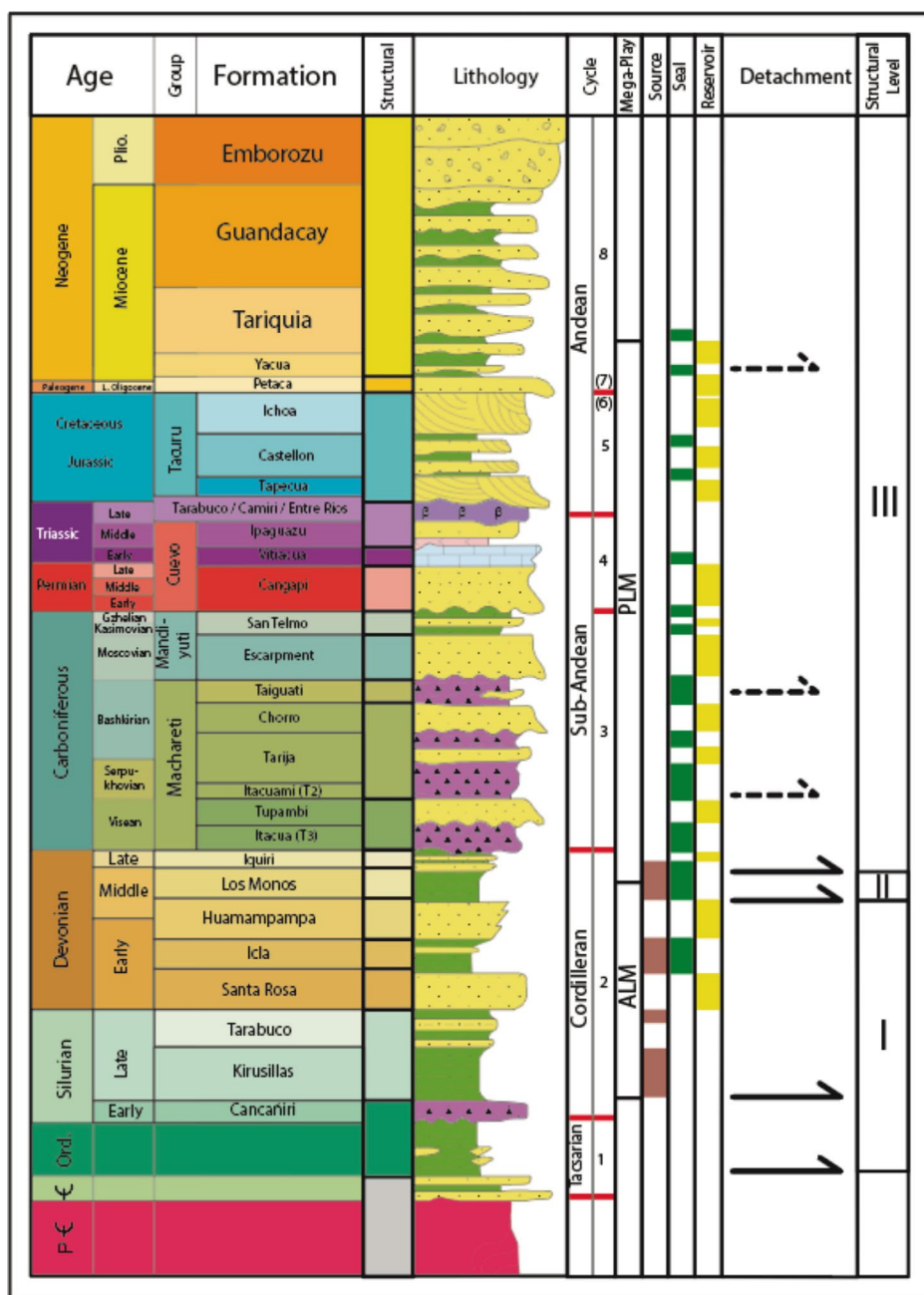


Figura 3. Columna crono y lito-estratigráfica simplificada para el Sur del Subandino Sur. En la parte central se resumen los elementos del sistema petrolífero. A la derecha se detalla la posición y funcionamiento de los despegues y se definen los pisos estructurales.

secuencias definidas. En particular, se definen en esta figura, la secuencias del Devónico que fueron utilizadas para construir los mapas de ambiente de deposición.

Con el fin de generar mapas de paleo-ambientes de sedimentación regionales para cada una de las secuencias estratigráficas y mapas de propiedades (Espesor, arena neta, porosidad, net to gross, carbono orgánico total...), se realizaron transectos estratigráficos integrando la totalidad

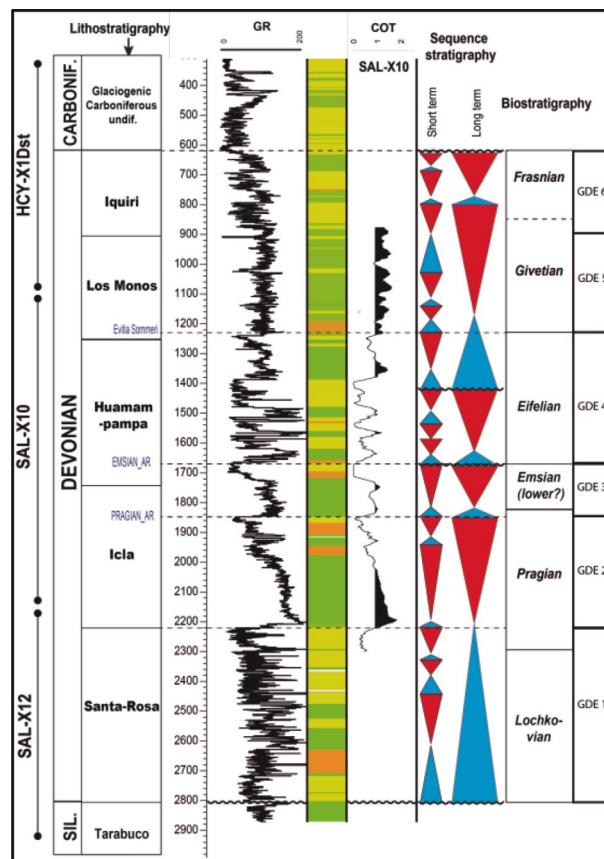


Figura 4. Ejemplo de columna estratigráfica compuesta que muestra las divisiones secuenciales que fueron utilizadas para la generación de los mapas regionales de ambiente de deposición.

de los pozos con núcleos (testigos coronas) y un máximo de pozos periféricos sin núcleos. Estos transectos fueron interpretados, cuando fue posible, siguiendo líneas sísmicas, pasando por los pozos escogidos o los más próximos posible, para poder seguir físicamente las superficies (mediante la sísmica, cuando esta información es apta) en las zonas sin pozos.

La Figura 6 es un ejemplo de una sección estratigráfica norte-sur (ver ubicación en la Figura 1)

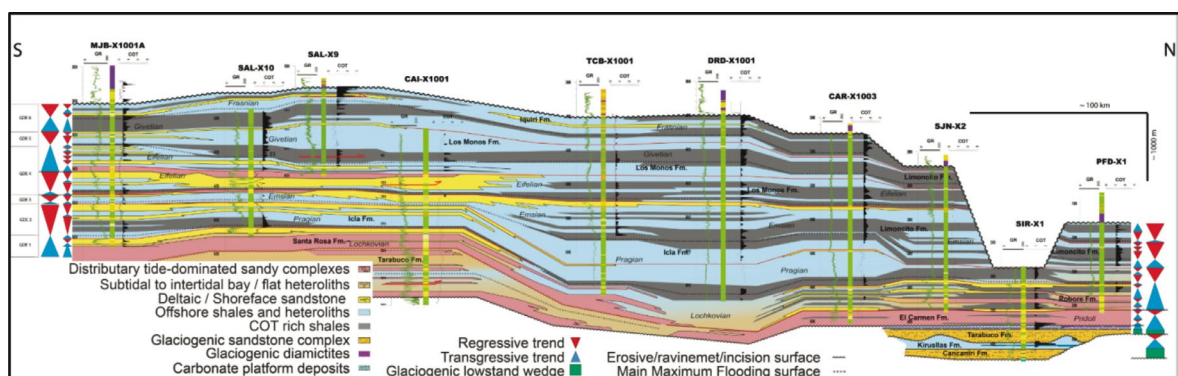


Figura 5. Ejemplo de sección lito-crono-estratigráfica norte-sur para el Silúrico y el Devónico del Sur de Bolivia. Las zonas grises representan los niveles más ricos en materia orgánica.

para el Silúrico y el Devónico adonde se enfatizó la distribución de los niveles más ricos en materia orgánica. El estudio regional (Beicip-Franlab, 2017 a, 2018) muestra que se puede encontrar rocas madre en el Devónico desde el Lochkaviano hasta el Frasniano. Sin embargo esas rocas madre no tienen una distribución espacial uniforme. Como consecuencia, para cada simulación numérica, se considera cada nivel con sus características locales extraídos de los mapas regionales.

Una vez finalizados los transectos y correlacionados los pozos se pudo generar, como en el ejemplo presentado en la Figura 6, mapas por secuencia de: ambiente de sedimentación (GDE en inglés: “Gross Depositional Environment”), espesor bruto, espesor neto, net-to-gross. La Figura 7 presenta los ambientes de sedimentación para las secuencias principales del Devónico inferior y medio.

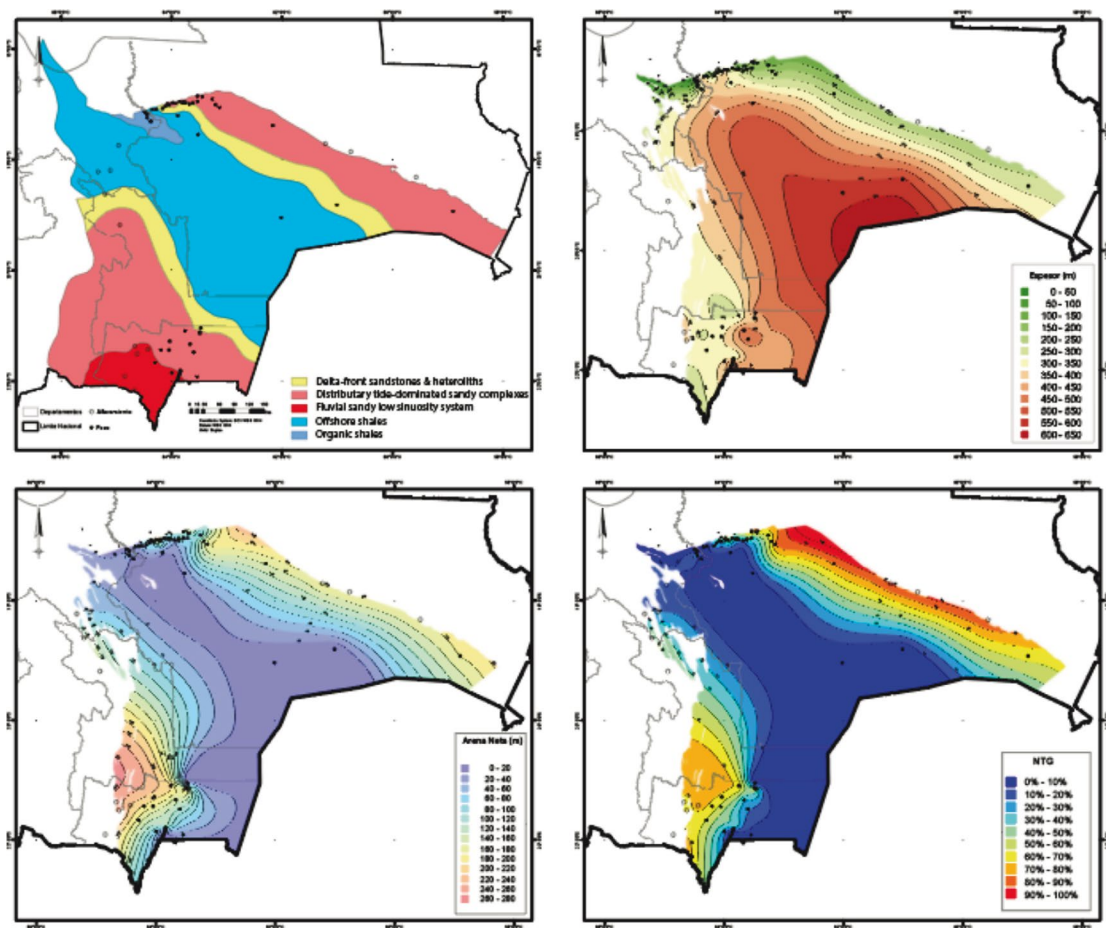


Figura 6. Caracterización sedimentológica del GDE 1 (Lochkoviano) del Sur de Bolivia. La definición de los GDE está en la Figura 4.

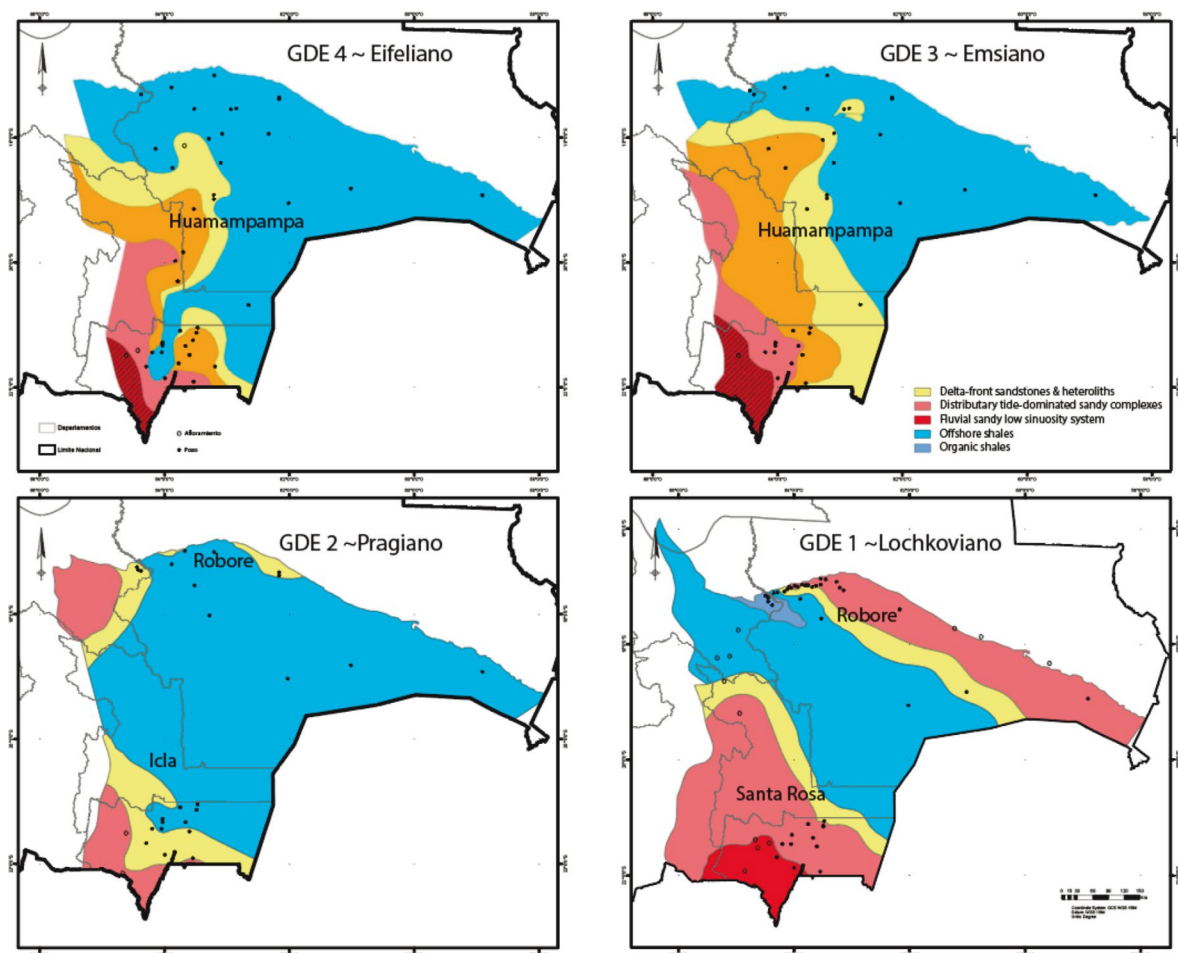


Figura 7. Mapas de paleo-ambiente de sedimentación de algunas secuencias del Devónico: El detalle de la definición de las secuencias y de la construcción de los mapas se puede ver en Beicip-Franlab (2018). La definición de los GDE está en la Figura 4.

Rocas Madre

Se llevó a cabo una síntesis de toda la data geoquímica disponible en el CNIH. La nueva base de datos contiene a la fecha más de 3600 análisis de pirolisis y más de 2400 datos de madurez.

	Frasniano	Givetiano	Eifeliano	Emsiano	Pragiano	Lochkoviano	Pridoliano	Kirusillas
Sitios	39	63	42	29	26	32	17	4
Datos	299	1692	392	388	316	211	58	22
COT (%)	0,93	0,87	0,74	0,78	0,89	0,99	1,18	1,25
IH (mg HC/g COT)	274	216	178	143	141	151	199	119
IO (mg CO ₂ /g COT)	59	70	83	85	110	62	58	45
Tmax (°C)	440	441	443	449	451	456	449	455
Ro (%)	0,68	0,78	0,91	1,03	1,05	1,10	1,02	1,21
COT° (%)	0,93	0,87	0,85	0,85	0,95	1,06	1,30	1,32
IH° (mg HC/g COT)	278	227	235	206	203	238	250	169

Tabla 1. Promedio de los datos geoquímicos que caracterizan las rocas madres potenciales del área. Los datos provienen de la nueva base de datos de YPF. En la tabla las líneas COT° e IH° corresponden a los valores de COT y de IH corregidos de los efectos de madurez.

En la Tabla 1 y la figura 8 se resumen los parámetros geoquímicos promedios que caracterizan las unidades con potencial generador de hidrocarburos en el Sur de Bolivia. En general y en promedio, cada secuencia del Silúrico y Devónico abarca niveles que pueden ser considerados como roca madre regular con valores de Carbono Orgánico Total (COT) alrededor de 1%. Los datos de pirolisis indican que, en promedio, esas rocas madre son de tipo III. Los niveles del Pridoliano, Givetiano y Frasniano muestran características más marinas siendo tipo II/III.

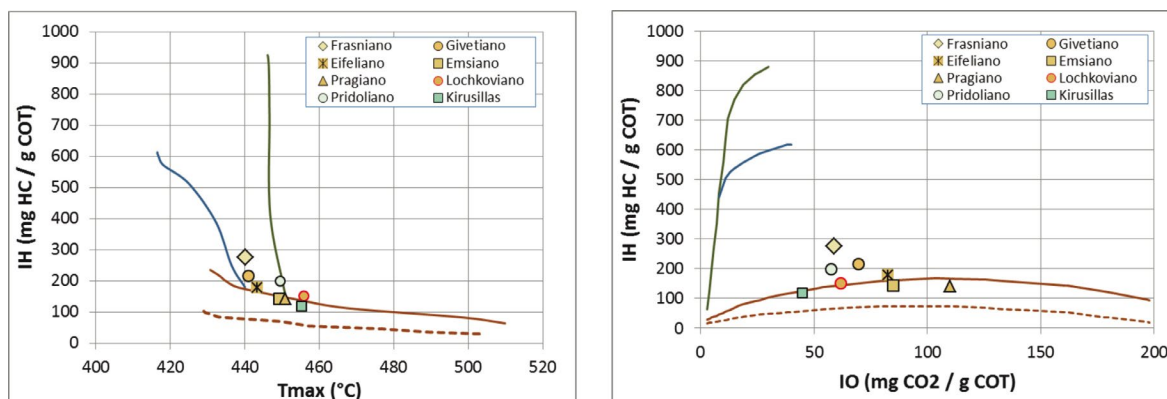


Figura 8. Caracterización geoquímica de las rocas madre potenciales del Sur de Bolivia con los datos de la Tabla 1

Hay que notar que las características de las diferentes rocas madres tienen variaciones espaciales notables tanto verticales como horizontales, como se puede observar en la Figura 5.

MODELO ESTRUCTURAL DE REFERENCIA

Para el estudio estructural del Subandino Sur, se interpretaron secciones regionales y realizaron estudios más detallados localmente. Se utilizó una metodología de trabajo específica que integra toda la información disponible para compensar la pobre calidad de la sísmica registrada en el Subandino. El objetivo es presentar un modelo de deformación y cinemático coherente y consistente de los pisos estructurales (Momburu y Aramayo Flores, 1986 y Aramayo Flores, 1989), desde el borde Oriental del Interandino hasta la Llanura Chaqueña, para ser utilizado como soporte del modelado del sistema petrolífero. En general, las edades de inicio de la deformación en cada lineamiento estructural fueron extrapoladas desde el Noroeste argentino tomando como principales fuentes de referencias a Hernandez *et al* (2002) y Echavarría *et al* (2003).

Un modelo estructural de referencia para el modelado del sistema petrolero y la restauración del mismo se presenta en la figura 8 (ver ubicación en la Figura 1), el cual tiene su extremo Occidental en el límite Oriental del denominado Interandino y se extiende al Este en el ámbito del antepais indeformado (Figura 1 y Figura 9).

En la parte occidental de la deformación el despegue principal involucra una cuña sedimentaria

del Ordovícico. La participación de estos sedimentos en la deformación del Subandino Occidental fue considerado inicialmente en los estudios realizados en las área Entre Ríos - O'Connor - Huayco en el año 1999 (XR s.r.l.). En este trabajo se asume con espesor cero (0) en el sinclinal entre Ñiñigüazu e Itau - San Alberto. A partir de este punto y hacia el Este, el despegue principal evolucionó por la base de la Fm. Kirusillas (Silúrico superior).

La longitud total de la sección es de 179 km de los cuales 94,8 km corresponden al Subandino Sur y su Piedemonte y 84,2 km al foot hill Oriental y la Llanura Chaqueña.

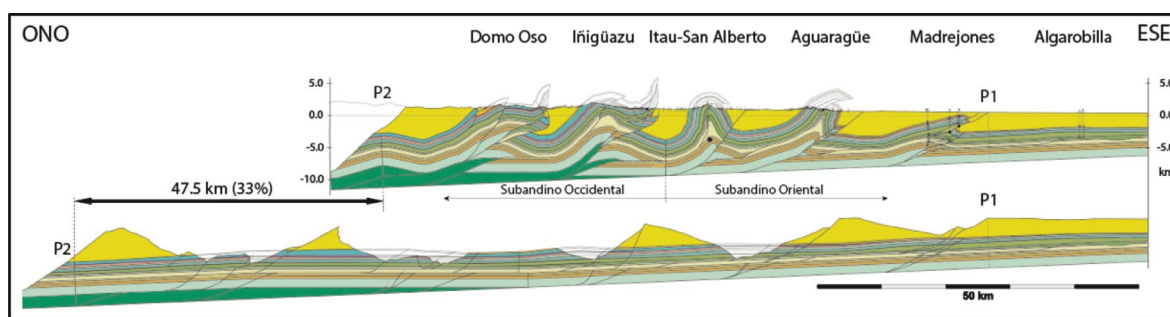


Figura 9. Restauración de la sección ubicada en la Figura 1, acortamientos calculados entre los pine lines (P1-P2) (Columna de referencia ver Figura 3).

La longitud restaurada entre los pine line P1 y P2 es de 142,3 km, con una extensión actual deformada de 94,8 km. El acortamiento total es de 47,5 km, lo que representa un 33 %.

En síntesis, en esta interpretación estructural se consideró que las estructuras profundas evolucionaron primero por mecanismo de flexión de fallas, transmitiendo la mayor parte del acortamiento por la base de la Fm. Los Monos mediante una cuña de techo pasivo (Bellotti *et al*, 1995) y parte hacia adelante, formando una estructura inicial somera. Mediante estos dos eventos se generó el abultamiento (por mecanismos internos que estos autores consideran aún muy poco conocidos: lift off?, dúplex?, tectofluencia?, etc) de los sedimentos de la Fm. Los Monos en los núcleos estructurales (piso estructural II), generando la disarmonía entre el piso estructural I y III (paquete sedimentario post-Los Monos). Las fallas fuera de secuencia que seccionan los pliegues originales formados por flexión de falla pueden ser muy posteriores a estos. Un ejemplo importante es tratado por Hernández *et al* (2011), quienes analizan los resultados del pozo Ramos.xp-12 (Argentina), ubicado en la Sierra de San Antonio al Sur de San Alberto-Itau, determinando una edad de 4,5 - 4 Ma para la estructura profunda principal y de 1 Ma para la falla fuera de secuencia que seccionó dicho anticlinal. Mientras que a la transmisión de acortamiento desde el Oeste, por la sección superior del Devónico, la ubican en ~6 Ma. La estructura de San Alberto - Itau debería tener la misma cinemática, independientemente de algunas discrepancias geométricas de detalle que pudieran existir entre las interpretaciones.

Cabe destacar, que en el Subandino Sur boliviano hay una importante falta de datos que permitan disminuir los grados de libertad e incertidumbres en las interpretaciones que se realizan.

Por ejemplo, no hay estudios detallados en toda la comarca de la columna sedimentaria de edad terciaria preservada en los sinclinales, que permita contar con líneas tiempo mapeadas, discriminar los ciclos sedimentarios pre-crecimiento, sin-crecimiento y piggy back (si hubiere), también son escasas las dataciones del inicio y evolución de las estructuras principales en cada lineamiento (AFT-ZFT). Por lo tanto, las interpretaciones que se realizan son seguramente imperfectas y con variable apartamiento de la realidad, lo cual se podrá mejorar con adquisición de los datos necesarios y modelando la estructura con diferentes mecanismos de deformación en busca de modelos alternativos, tal es el caso del modelo de deformación interpretado por Hernández *et al* (2016) en la Sierra de Aguaragüe para la estructura de Caigua, utilizando Trishear y considerando dos niveles incompetentes: Ludloviano-Pridoliano (Fm. Kirusillas) y Eifeliano-Givetiano (Fm. Los Monos) o las hipótesis geométricas y mecanismos de deformación planteados por Starck *et al* (2002).

LINEAMIENTO ESTRUCTURAL	EDAD ~ DE INICIO DE LA ESTRUCTURA PROFUNDA	EDAD APROXIMADA DE FALLAMIENTO PRINCIPAL (PE I) FUERA DE SECUENCIA	CORRELACIÓN / EXTRAPOLACION DE:
SAN TELMO	8.5-9 Ma (*)	~ 4.5 Ma (*)	Sa. de Pescado / Nogalito (*)
SUARURO	6,9 - 6.5 Ma (*)	~ 4.0 - 4.5 Ma (asumido arbitrariamente)	Sa. Baja de Orán (*)
SAN ANTONIO	4.5 - 4.0 Ma (* y **)	1 Ma (*)	Sa. de San Antonio (* y **)
AGUARAGUE	2,7 Ma (*)	<= 1.5 Ma (asumido)	Sa. de Aguarague (*)
MADREJONES - VILLAMONTES	1.5 Ma ? (asumido)		Camo Durán - Madrejones
INGRE-MONTEAGUDO - ILLINCHUPA-MARTÍN GALVEZ	8.5 - 9 Ma (*)	~ 4.5 Ma (*)	Sa. de Pescado / Nogalito (*)
IGUEMBE - IÑAU - MORTERO	7.5 - 8 Ma ?	< 4.5 Ma ? (asumido arbitrariamente)	Sa. de Pintascayo - Churuma (*)
INCAHUASI	~ 7.5 - 6.9 ? (asumido arbitrariamente)		Entre: Sas. De Pintascayo-Churuma y Baja de Orán (*)
SARARENDA - CAMIRI - CAROHUAICHO	6,9 - 6.5 Ma (*)	~ 4.0 - 4.5 Ma (asumido arbitrariamente)	Sa. Baja de Orán (*)
ESCONDIDA - TATARENDA	4.5 - 4.0 Ma (* y **)	1 Ma (**)	Sa. de San Antonio (* y **)
CHARAGUA	2,7 Ma (*)		Sa. de Aguarague (*)
(*) Extrapolado aproximadamente de Hernández et al (2002) y Echavarría et al (2003).			
(**) Extrapolado de Hernández et al (2011).			
PE I: Piso estructural I (se refiere a fallas fuera de secuencia que seccionan el pliegue profundo).			

Tabla 2. Edades utilizadas, para cada lineamiento estructural, del inicio de levantamiento de las estructuras profundas y posterior fallamiento fuera de secuencia.

Utilizando como principales fuentes de datos cinemáticos a Hernández *et al* (2002), Echavarría *et al* (2003) y Hernández *et al* (2011) se realizó una extrapolación hacia el norte de las edades de inicio de la deformación de la estructura profunda (piso estructural I) para los lineamientos estructurales del Subandino Sur boliviano, aunque en algunos casos se asumen posibles edades de levantamiento con cierta arbitrariedad (Tabla 2). Si bien recientemente algunas operadoras realizaron trabajos que incluyeron dataciones de la cinemática de la deformación, aún no están disponibles esos datos, los cuales posiblemente permitan disminuir incertidumbres en algunos lineamientos estructurales.

MODELO DINÁMICO

Calibración termal

Se llevó a cabo una síntesis de los datos térmicos de Bolivia. A la fecha la base de datos está constituida de más de 380 pozos. El gradiente térmico promedio del Subandino Sur, determinado a partir de los datos de pozos, es alrededor de $19^{\circ}\text{C}/\text{km}$ como se puede ver en la Figura 10. Los datos de temperatura se calibran con un flujo térmico actual, 20 km por debajo de la base de los sedimentos silúricos, alrededor de $13 \text{ mW}/\text{m}^2$ como se puede ver en la Figura 10. El flujo de calor promedio estaría cerca de $21 \text{ mW}/\text{m}^2$ en la base de los sedimentos. Se utiliza un flujo de calor 20 km por debajo de los sedimentos para integrar los efectos transitorios como la sedimentación o las erosiones.

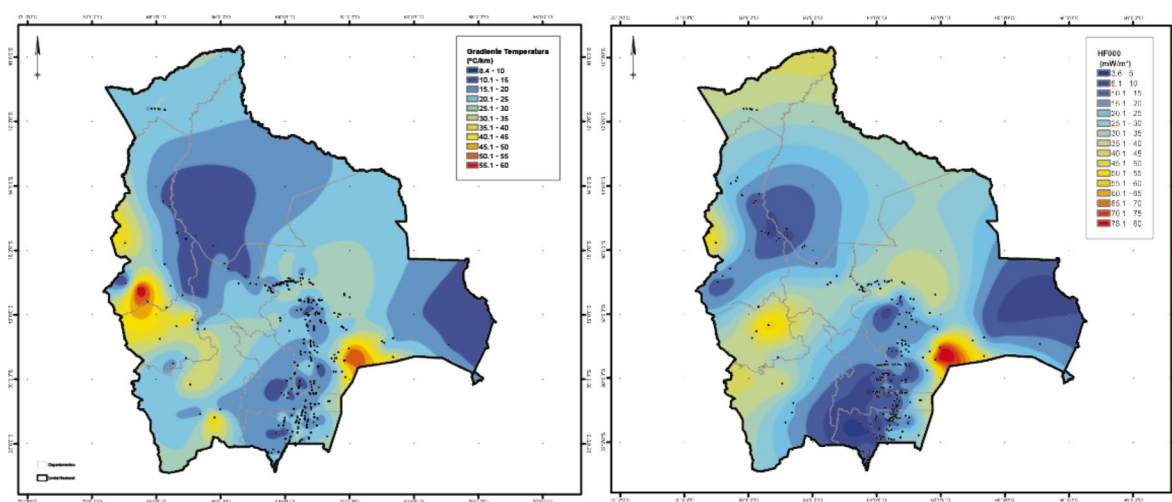


Figura 10. Mapa del gradiente térmico y del flujo de calor actual 20 km por debajo de la base de los sedimentos silúricos.

Regionalmente, utilizando un flujo de calor constante para ajustar los datos de temperatura no se logran calibrar los datos de madurez disponibles. El análisis de los datos geoquímicos muestra la existencia, en los sedimentos paleozoicos, de un gradiente de madurez anómalo que tiene un carácter regional y que podría ser testigo de un evento termal caliente en el pasado, al cual se le ha atribuido una edad Triásico a Jurásico temprano por lo siguiente:

- Existencia de un vulcanismo (Camiri, Entre Ríos y Tarabuco) Triásico superior a Jurásico inferior en el Sur de Bolivia (ver Tabla 3)
- Existencia de un plutonismo Triásico y Jurásico en la Cordillera Real.
- El estudio regional de la parte norte de Bolivia indica un máximo térmico en esta época (Schneider *et al* aceptado).

	Sempere (1995) K/Ar	Bertrand et al (2005) 40Ar/39Ar	Kusiak (2009) 40Ar/39Ar	Bertrand et al (2014) 40Ar/39Ar
Tarabuco	171,4 ±4,2	196,1 ±1,5		198,1 ±1,5
Entre Ríos			181,5 ±0,9	
Camiri		203,7±4,1	204,3 ±1,4	199,2 ±2,2

Tabla 3. Edades del vulcanismo del Sur de Bolivia. Se nota una convergencia hacia el límite entre el Triásico y el Jurásico.

Este evento termal ya ha sido reconocido en La cuenca de Madre de Dios (Schneider *et al.*, en prensa). Se logra una buena calibración termal con los pozos tomando en cuenta un aumento del flujo termal durante el Mesozoico, como se puede ver en la Figura 11.

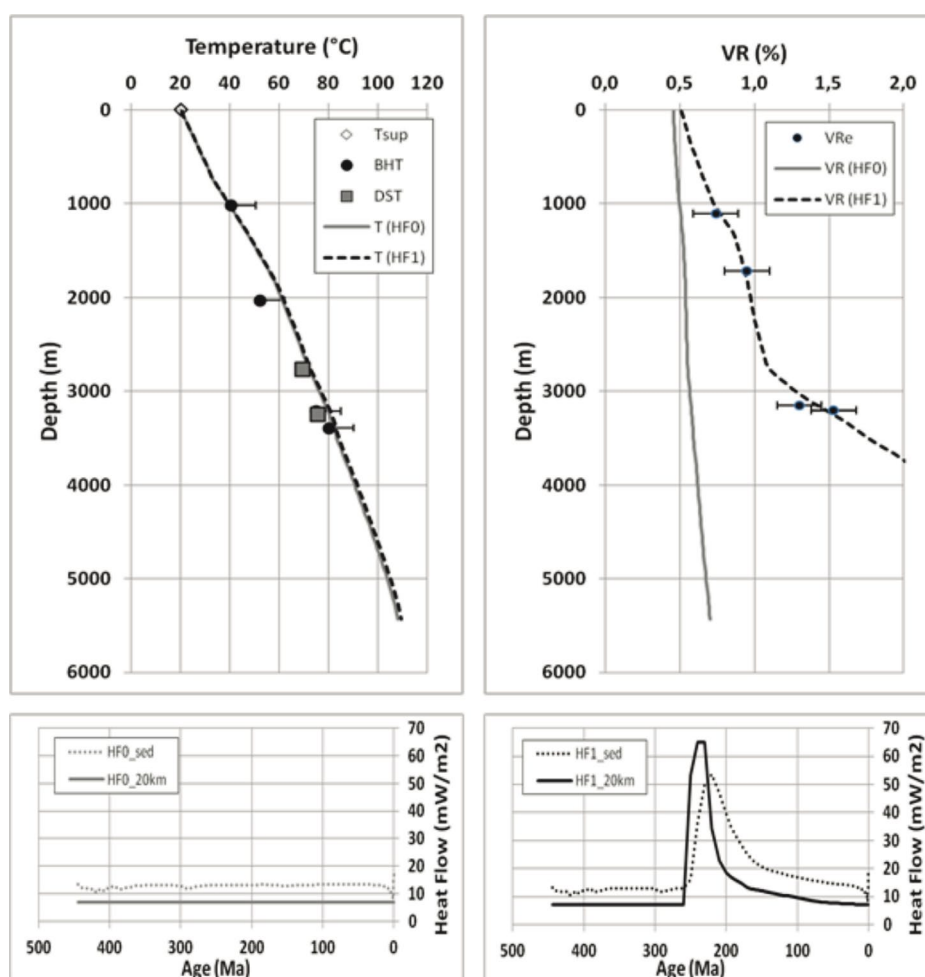


Figura 11. Ejemplos de calibración termal para el Subandino Sur. En un primer paso se llevó a cabo una calibración de la temperatura con un flujo constante (HF0), luego se calibró la madurez con el flujo variable (HF1). La temperatura calculada por el modelo coteja los datos en ambos escenarios y solo el escenario con flujo variable permite cotejar los datos de madurez.

Este trabajo de calibración termal se realizó con más de 200 pozos en Bolivia, Sur del Perú, Norte de Argentina y Norte del Paraguay. Se generó un mapa del flujo del calor Triásico (Figura 12) en el cual se pudo notar que este evento termal tiene un carácter regional. Se nota también variaciones espaciales de la intensidad del flujo de calor.

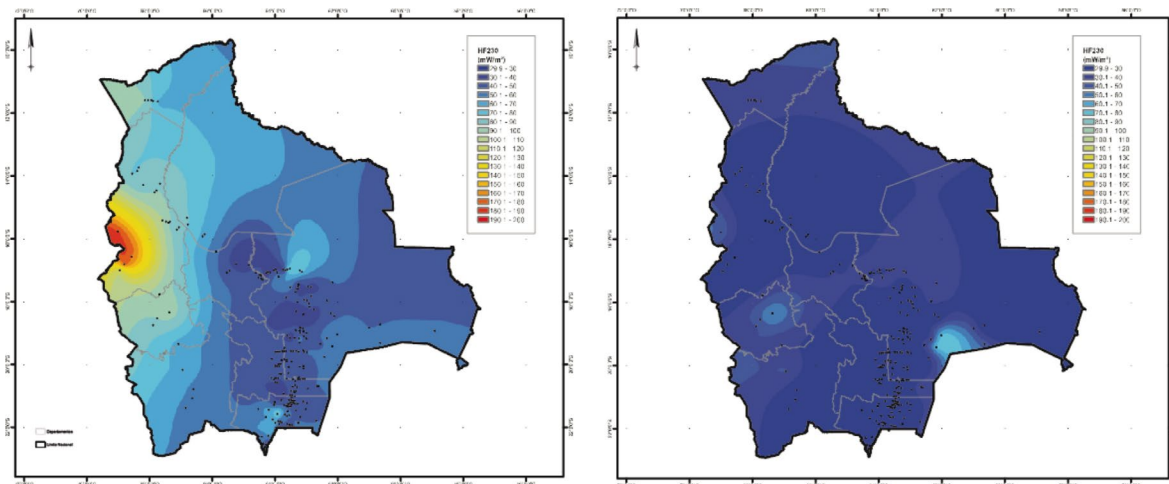


Figura 12. Izquierda: Mapa del flujo de calor Triásico 20 km por debajo de los sedimentos silúricos. Derecha: Mapa de flujo actual con la misma escala de color.

Para la calibración termal del Subandino Sur, se necesita un flujo promedio en el Triásico de 47 mW/m^2 , 20 km por debajo de la base de los sedimentos silúricos, como se puede ver en la figura 12.

Madurez

Hasta la fecha, se llevaron a cabo las calibraciones termales y de madurez para más de 200 pozos (ver ubicaciones en la Figura 1). Además se agregaron pozos ficticios para calcular los volúmenes expulsados en los sinclinales que carecen de pozo exploratorio. Esa red de pozos que comparten la misma columna crono-estratigráfica, permitió generar mapas de madurez para cada una de las secuencias consideradas.

En la Figura 13 se presentan algunos mapas de madurez para secuencias del Devónico. Se destaca que el Givetiano (Fm Los Monos) está al inicio o en ventana de petróleo y el Pragiano (Fm Icla) está en ventana de gas. Los datos isotópicos de algunas muestras de gas de campos del Subandino Sur (Cruz *et al.*, 2002) indican valores (0.9 – 1.3 % para el play PLM; 0.85 – 1.8 % para el play ALM) más compatibles con la madurez de la formación Icla que con la madurez de la Fm Los Monos. Sin embargo, los valores menores a 1.0 % pueden correlacionarse con la madurez de la base de la formación Los Monos en algunos lugares.

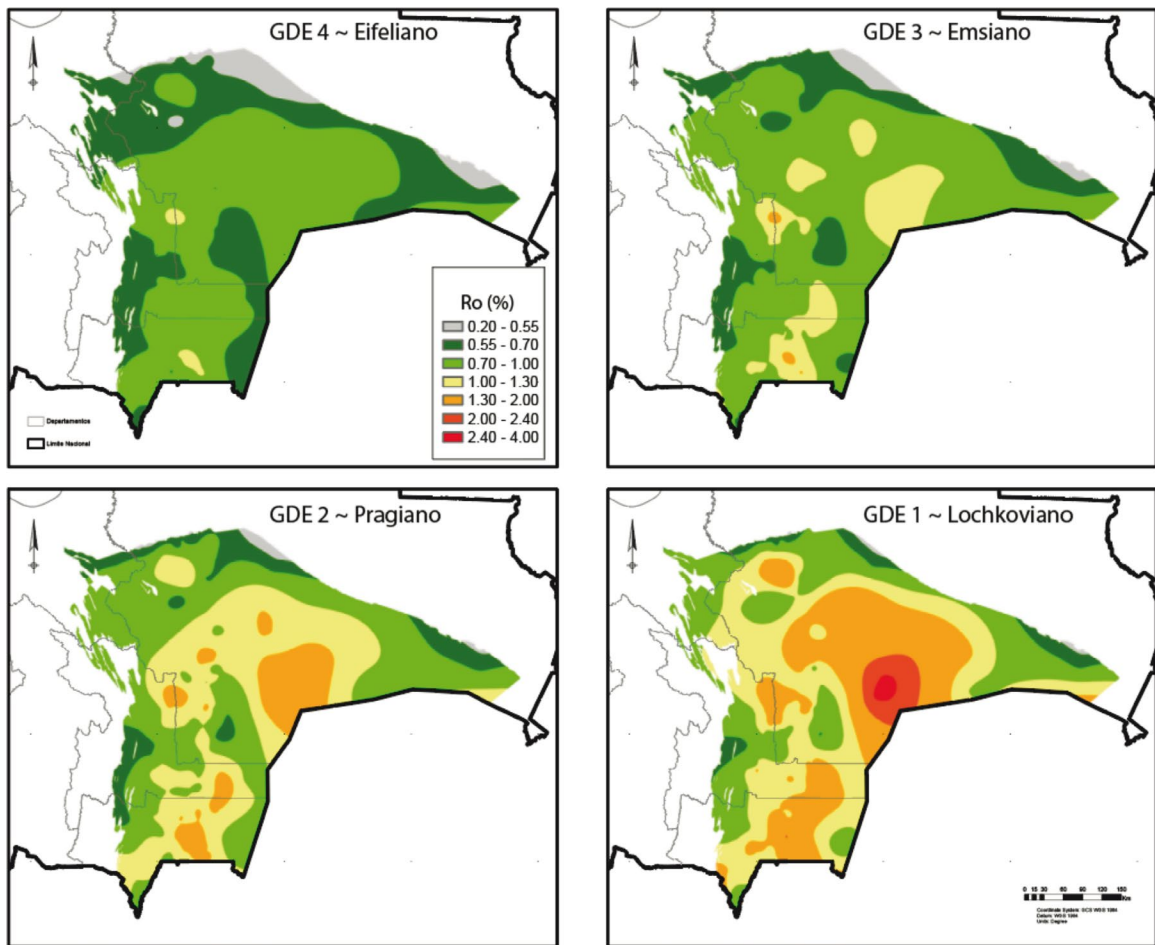


Figura 13. Mapas de madurez (reflectancia de vitrinita) calculada para algunas secuencias del Devónico en el presente.

Expulsión

Como consecuencia del evento termal aquí considerado, una gran parte de los hidrocarburos fueron expulsados durante el evento termal Mesozoico, como se puede ver en la figura 12 que representa la evolución de lo que queda para expulsar hasta hoy (SPI Remanente) durante los tiempos geológicos. Eso implica que si existen trampas estructurales o estratigráficas más antiguas a ese tiempo, podrían definir nuevos plays con potencial equivalente o más elevado que lo descubierto hasta la fecha, por ejemplo, como plays conceptuales se pueden mencionar (Beicip-Franlab, 2017b, 2018):

1. La cuña paleozoica del Silúrico y del Devónico contra el escudo brasilero.
2. Las trampas estratigráficas dentro del Carbonífero glacial.
3. Las estructuras pre-jurásicas. Hay que notar que estructuras Jurásicas a Cretácicas han sido postuladas por Hernandez *et al* (en prensa) para explicar las variaciones de espesores en el Subandino Sur Boliviano, pero estas son demasiadas jóvenes para aplicar.

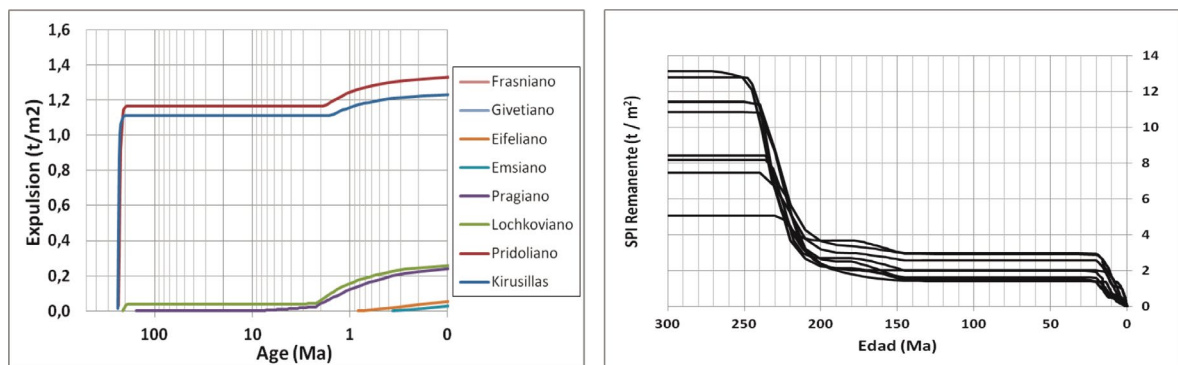


Figura 14. Izquierda: Curvas de expulsión para el pozo CAI-X11. La escala de tiempo es logarítmica para enfatizar la expulsión andina. Derecha: Curvas de SPI remanente global (suma de la expulsión de cada una de las rocas madre), calculadas para varias ubicaciones del Subandino Sur, mostrando las dos (2) fases de expulsión: una fase principal durante el Triásico tardío y una segunda fase durante la deformación andina.

Esa fase de expulsión temprana puede explicar también porque las trampas recientes, asociadas a la fase tectónica andina, están principalmente llenas con gas, pues los fluidos poco maduros fueron expulsados antes de la estructuración andina. No obstante, no hay que olvidar que los querógenos del Silúrico y del Devónico son de tipo III o II/III más proclives a generar

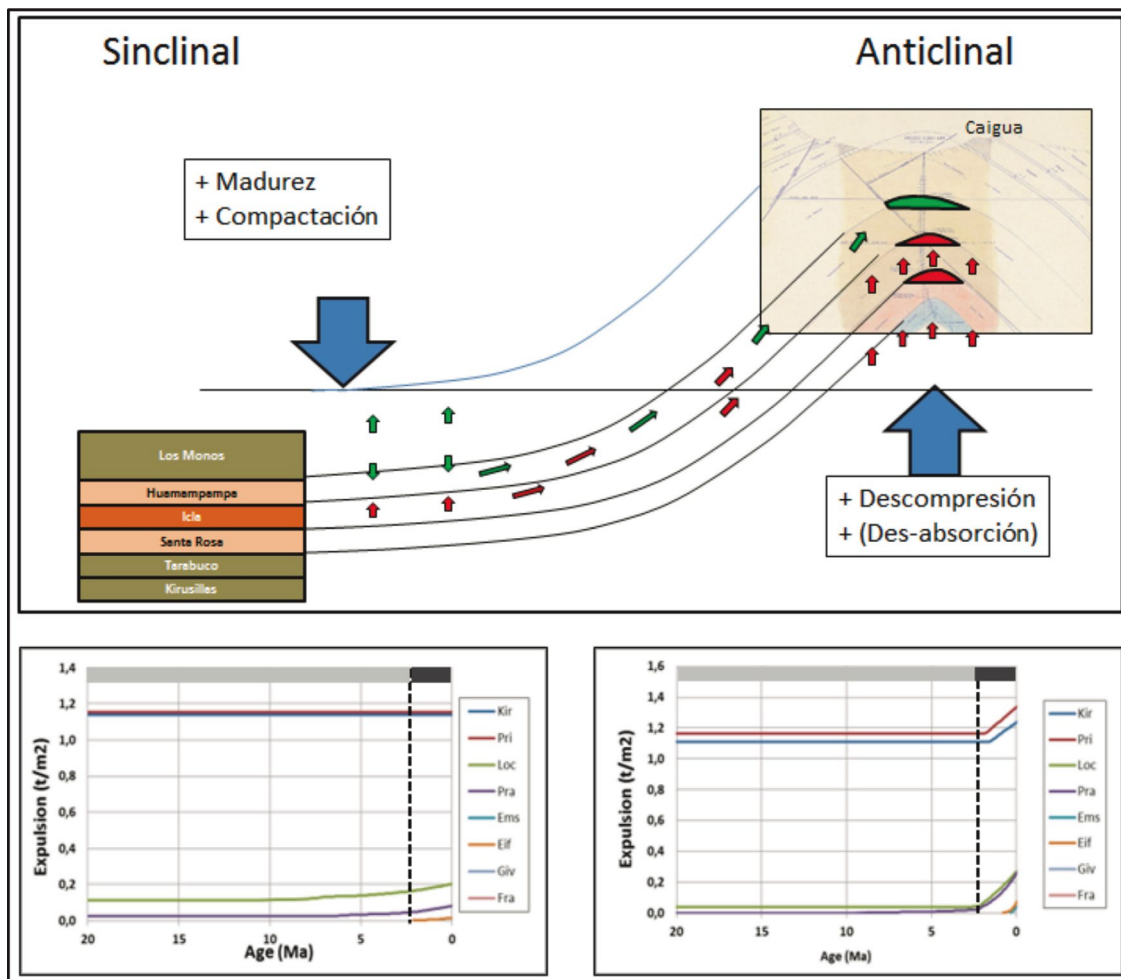


Figura 15. Esquema del funcionamiento del sistema petrolífero durante la fase de deformación andina. En los sinclinales, se calcula una expulsión por compactación y aumento de madurez. En los anticlinales se calcula una expulsión por descompresión.

gas que petróleo. La expulsión temprana contradice el paradigma que los principales episodios de expulsión de las rocas generadoras devónicas se produjeron asociados a la tectónica andina, durante el Terciario Superior (Dunn *et al.*, 1995; Moretti *et al.*, 1996; Cruz *et al.*, 2008).

También se calculó (Fig 12) una expulsión reciente, por efecto de: (1) Compactación e incremento de madurez en los sinclinales; (2) Descompresión y probablemente des-absorción en los anticlinales (Fig 13). Hay que notar que los balances de material que se llevaron a cabo hasta la fecha con la metodología que se explica más adelante (Beicip-Franlab, 2017 b) muestran que los volúmenes descubiertos en los campos existentes estudiados se pueden explicar con únicamente este segundo pulso andino.

Los parámetros claves que determinan la expulsión de los hidrocarburos con la formación de las trampas andinas son:

- La sedimentación sin y post tectónica en los sinclinales.
- La amplitud del uplift durante la formación de los anticlinales.

Los volúmenes expulsados que participan de la carga son función principalmente de:

- La superficie de la fetch área.
- El potencial remanente de las rocas madre al momento de la estructuración.
- La edad de la estructuración.

MODELO DE CARGA

El estudio regional que se está llevando a cabo en el Sur de Bolivia incluyendo el Subandino y el Piedemonte, muestra que la carga (en toneladas) de los campos conocidos, en ambas zonas morfo-estructurales, puede ser evaluada con el siguiente balance de material (Beicip-Franlab, 2017 b):

$$\text{Carga} = \text{FA} * \text{SPI} (\text{Edad}) * \text{PSY}$$

En esa fórmula:

- FA (m²) es la superficie de la “fetch” área actual de la estructura. O sea, la zona adonde los hidrocarburos expulsados por las rocas madre pueden migrar hacia la trampa considerada.
- SPI (tonelada / m²) es la producción remanente de las rocas madres a la edad de la estructuración.
- PSY es el coeficiente de eficiencia. Es la relación entre lo que ha sido entrampado con lo que ha sido expulsado dentro de la Fetch área.

La interpretación sísmico-estructural permite definir la superficie de la zona de drenaje actual de la estructura que se está evaluando. La edad de la estructura se estima a partir del conocimiento regional y de estudios anteriores (ver Tabla 2). La estimación del potencial remanente está basada en las curvas de producción de las rocas madres calculadas con modelos geoquímicos 1D. El coeficiente de eficiencia PSY se evalúa con los campos existentes, adonde la carga se estima con

los hidrocarburos originales en sitio probados y probables (2P).

A la fecha, las calibraciones del coeficiente de eficiencia arrojan un valor promedio de 21 % (desviación estándar de 12 %). La evaluación conseguida esta calibrada con datos de cálculo de volúmenes en sitio que provienen del libro de las reservas (Ryder Scott, 2009), que solo considera lo probado y probable. Como consecuencia, tiene que ser considerada como una estimación conservadora. Ciertas estructuras utilizadas para la calibración pueden estar llenas hasta su punto de fuga. Por lo tanto, la estimación tiene que ser considerada como un valor piso de referencia.

Hay que notar que el coeficiente de eficiencia aplica a los volúmenes expulsados a partir del principio de la creación de la estructura y no a la totalidad de lo que ha sido expulsado. Si se aplica al total del volumen expulsado, el coeficiente de eficiencia sería del orden de 2 a 4 %.

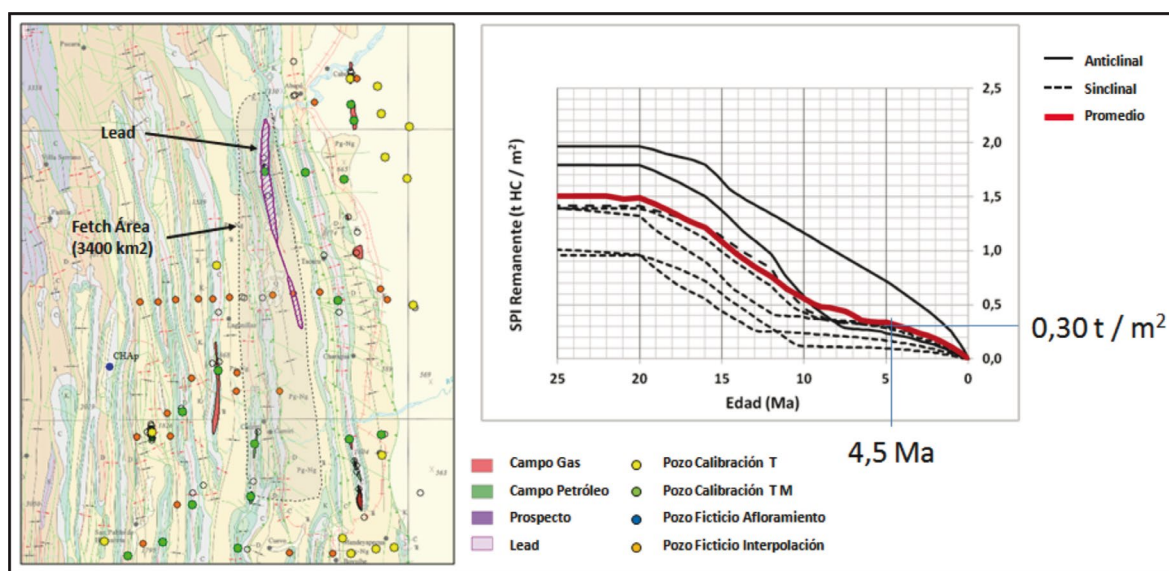


Figura 16. Ejemplo de cálculo de llenado de una trampa.

En el ejemplo presentado en la Figura 14, la “fetch” área ha sido estimada cercana a 3400 km². La curva de SPI remanente para la fetch área se determinó como promedio de varias simulaciones 1D ubicadas en posición anticlinal y sinclinal. Del estudio regional se infirió una edad de 4.5 Ma (ver Tabla 2) para la formación de la estructura, lo que permite derivar un SPI remanente de 0.30 t HC/m² y utilizando una eficiencia de 25% se obtiene una carga promedio aproximada de 9 Tcf. Por lo tanto, se puede esperar encontrar este volumen en la/las estructura/ras profundas que están ubicadas dentro de dicha “fetch” área.

Las principales incertidumbres del cálculo del SPI remanente con modelo geoquímico 1D se basan en:

- La definición de las propiedades originales de las rocas madres.
- Los parámetros cinéticos composicionales para modelar los querógenos de las rocas madres.

- Los parámetros petrofísicos para caracterizar y modelar la compactación y la expulsión de las rocas madres.

En el caso de un prospecto para el cual se logra definir el volumen del tanque (VT) disponible, se puede definir un factor de llenado (FLL) como: $FLL = \text{Carga} / VT$. Cuando este factor supera el 100%, la trampa está llena hasta su punto de fuga.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Con el fin de reducir las incertidumbres y el riesgo exploratorio se llevó a cabo una síntesis geológica regional del Sur de Bolivia. Además de proveer un marco regional para la evaluación de los prospectos, este estudio logró aclarar, de una manera no definitiva, la caracterización de las diferentes rocas madre involucradas en los sistemas petrolíferos del área. Se reconocen en el Silúrico y el Devónico algunos niveles con potencial de roca madre. Esos niveles se caracterizan por tener una distribución espacial no homogénea.

El análisis de los sistemas petrolíferos muestra, en los sedimentos paleozoicos, de manera contundente la existencia de un gradiente de madurez elevado de carácter regional y que solo se puede explicar tomando en cuenta un evento termal caliente, probablemente de edad Triásico. Dicho evento tiene como consecuencia que la mayoría de los hidrocarburos fueron expulsados durante ese episodio termal Mesozoico. Se calcula también una expulsión reciente pero limitada por efecto de (1) Compactación e incremento de madurez en los sinclinales; (2) Descompresión y probablemente des-absorción en los anticlinales.

Se desarrolló una metodología que permite la evaluación de un volumen medio de hidrocarburos disponible para cada estructura estudiada, tomando en cuenta los datos de los campos análogos existentes y el conocimiento actual que se tiene de los sistemas petrolíferos.

Recomendaciones

En el Subandino Sur se está demostrando que durante la fase andina la expulsión está controlada por la deformación y por lo tanto se anula el riesgo de sincronización. Sin embargo, los volúmenes expulsados durante la deformación dependen de la amplitud del uplift en el anticlinal y del espesor de los sedimentos sin y post deformación en los sinclinales. Para reducir las incertidumbres se necesita mejorar el conocimiento de esos dos parámetros.

Como se está identificando un evento termal Mesozoico de carácter regional, se necesita mejorar la definición de la historia térmica en Bolivia.

Para contar con una evaluación de los volúmenes expulsados con mayor precisión, se deben

reducir las incertidumbres sobre los parámetros que definen las rocas madre. En particular, se necesita determinar los parámetros cinéticos de los querógenos de las mismas. De una manera más general, es menester caracterizar las diversas rocas madres de una manera precisa.

Parte de la expulsión reciente, está relacionada con el incremento de la compactación de las rocas madres, por lo tanto es necesario caracterizar el comportamiento mecánico de esas lutitas a través de las curvas de compactación.

Como la mayoría de la expulsión ocurrió durante el evento termal Mesozoico, es de primordial importancia caracterizar las posibilidades de migración y entrapamiento de los hidrocarburos que fueron expulsados en dicha época.

REFERENCIAS CITADAS

- Aramayo Flores, F., 1989, El cinturón plegado y sobrecorrido del norte argentino: Boletín de Informaciones Petroleras, Tercera Epoca, v. 17, p. 2-16.
- Baby, P., Herail, G., Lopez, J.-M., Lopez, O., Oller, J., Pareja, J., Sempere, T. and Tufino, D., 1989. Structure de la Zone Subandine de Bolivie: influence de la géométrie des séries sédimentaires antéorogéniques sur la propagation des chevauchements. C.R. Acad. Paris, 309(II): 1717-1722.
- Beicip-Franlab, 2017 a, Análisis del Proceso en la Evaluación de la Propuesta de Perforación Yarara-X1 (YRA-X1), Informe disponible en el CNIH, YPFB, Santa Cruz de la Sierra, Bolivia, 11 pp.
- Beicip-Franlab, 2017 b, Estudio Regional del Subandino Sur, Versión 1, Informe disponible en el CNIH, YPFB, Santa Cruz de la Sierra, Bolivia, 91 pp.
- Beicip-Franlab, 2018, Síntesis Estratigrafía del Sur de Bolivia (Subandino Sur, Piedemonte, Llanura Chaqueña) – Versión 2, Informe disponible en el CNIH, YPFB, Santa Cruz de la Sierra, Bolivia, 138 pp.
- Belotti, H. J., L. L. Saccavino, G. A. Schachner, 1995. Structural styles and petroleum occurrence in the Subandean fold and thrust belt of northern Argentina. In: A.J. Tankard, R. Suarez Soruco and H. J. Welsink Eds.: Petroleum Basins of South America. AAPG Memoir 62, p. 545-555.
- Bertrand, H., Fornari, M., Marzoli, A., Sempere, T. y Feraud, G., 2005, Early Mesozoic rift-related magmatism in the Bolivian Andes and Subandes: The southernmost record of the Central Atlantic Magmatic Province. 6th International Symposium on Andean Geodynamics (ISAG 2005, Barcelona), Extended Abstracts: 111-114.
- Bertrand H., Fornari M., Marzoli A., Garcia-Duarte R., Sempere T., 2014, The central atlantic magmatic province extends into Bolivia. Lithos 188, pp. 33-43.
- Cruz, C., J., Oler, M., Di Benedetto, M., Pereira, and, H., Villar, 2008, Los sistemas petrolíferos devónicos del Subandino Sur y Pie de Monte de la cuenca de Tarija, Bolivia, VII Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos (Simposio de Sistemas Petroleros de las Cuencas Andinas), extended abstract pp. 159-187.
- 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 19 p, Mar del Plata, Argentina.

- Dunn J., K. Hartshorn y P. Hartshorn, 1995, Structural styles and hydrocarbon potencial of the Sub-Andean Thrust Belt of Southern Bolivia, en A.J. Tankard, R. Suarez S. y H.J. Welsink, eds., *Petroleum Basins of South America*, American Association of Petroleum Geologists Memoir 62, p. 523-543.
- Echavarria, L., R. Hernandez, R. Allmendinger, and J. Reynolds, 2003, Subandean thrust and fold belt of northwestern Argentina: Geometry and timing of the Andean evolution: AAPG Bulletin, v. 87, no.6, p. 965-985.
- Hernández, N., Iribarne, M., Aprea, D., Laffitte, G. y Vergani, G., 2011. Nuevos conceptos estructurales a partir de la perforación del pozo profundo Ramos xp-1012 en el Yacimiento Ramos, Sierra de San Antonio, Provincia de Salta. 8° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, IAPG. Trabajos Técnicos. Mar del Plata, Argentina.
- Hernández, R.M., Cépedes, A., Dellmans, M., Pérez, M.A. y Dalenz Farjat, A., 2016: XXII Congreso Geológico Boliviano, 16-19 Nov. 2016, Santa Cruz de la Sierra, Bolivia.
- Hernández, R.M., Echavarría, L., Allmendinger, R., Reynolds, J., Jordan, T. 2002. La Faja Plegada y Corrida Subandina del Noroeste Argentino. Secuencias Precrecimiento y Crecimiento, geometría estructural y tiempo de evolución de Los Andes. 5° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos. Mar del Plata. Argentina. 25 pgs.
- Jaillard, E., Herail, G., Monfret, T., Diaz- Martinez, E., Baby, P., Lavenu, A., and Dumont, J. F., 2000, Tectonic Evolution of the Andes of Ecuador, Peru, Bolivia and Northernmost Chile, in Cordani, U. G., Milani, E. J., Thomaz Filho, A., and Campos, D. A., (eds) "Tectonic Evolution of South America", p. 481-559. Rio de Janeiro 2000.
- Lohmann, H. H., 1970, Outline of tectonic history of Bolivian Andes: AAPG Bulletin, v. 54, p. 735-757.
- Kusiak, M.E., 2009. Le Mésozoïque du système subandino de Bolivie: évolution sédimentaire et synthèse de bassin. Géologie alpine. Mémoire hors-série no. 52, 92 pp.
- Mombru, C. F. y Aramayo Flores, F., 1986, Geología del Yacimiento de Aguaragüe: Boletín de Informaciones Petroleras, Tercera Epoca, v. 6, p. 53-64.
- Moretti I., E. Díaz Martínez, G. Montemurro y M. Pérez; 1995. The Bolivian Source Rocks. Subandean Zone, Madre de Dios, Chaco. Revue de l'Institut Français du Pétrole 50, 753-777.
- 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, Bolivia, *Petroleum Geoscience*, v 2, p. 17-28.
- Roeder, D., and R. L. Chamberlain, 1995, Structural geology of sub-Andean fold and thrust belt in northwestern Bolivia, in A. J. Tankard, R. Suárez S., and H. J. Welsink, *Petroleum basins of South America: AAPG Memoir 62*, p. 459-479.
- Ryder Scott, 2009, Certificación de las reservas de hidrocarburos de Bolivia. Informe disponible al CNIH.
- Schneider F., S. Rousse, G. Gutierrez, J.L. Faure, J. Pareja, A. Lemgruber, O. Padilla, (in press), Hydrocarbon Potential of the Eastern Madre de Dios Basin, Bolivia. *Petroleum Basins and Hydrocarbon Potential of the Andes of Peru and Bolivia*. AAPG Memoir.
- Sempere T., 1990, Cuadros estratigráficos de Bolivia: propuestas nuevas: *Revista Técnica de YPF*, 11 (2-3), p. 215-227.

- Sempere, T., 1995, Phanerozoic evolution of Bolivia and adjacent regions, in A. J. Tankard, 207 R. Suárez S., and H. J. Welsink, Petroleum basins of South America: AAPG Memoir 62, p. 207–230.
- Starck, D., Constantini, L. y Schulz, A. 2002, Analisis de algunos aspectos geométricos y evolutivos de las estructuras de la faja plegada Subandina del norte de Argentina y el sur de Bolivia, in V Congreso de exploración and Desarrollo de Hidrocarburos: Mar del Plata, Argentina, Trabajos técnicos, 15 p.
- XR s.r.l., 1999. Informe Geológico, Areas Entre Rios – O'Connor – Huayco. Departamentos de Chuquisaca y Tarija, Bolivia. Para Pluspetrol Energy. 232. pgs. Informe Inédito.