

NUEVAS CONSIDERACIONES SOBRE EL MODELO DE DEFORMACIÓN EN LA SIERRA DE AGUARAGUE

Roberto Hernández¹, Ariel Céspedes², Mariano Dellmans¹,
Miguel Ángel Pérez Leyton³, Alejandra Dalenz Farjat¹

¹ XR GEOMAP Av. Ricardo Durand 397, Barrio Grand Bourg, 4400 Salta Capital, Argentina
² YPFB Chaco S.A. Edificio Centro Empresarial Equipetrol, 6to Piso, Av. San Martín N°1700,
Equipetrol Norte, Santa Cruz de la Sierra, ³ Consultor, Los Pitones N°2035 Santa Cruz de la Sierra, Bolivia

RESUMEN

En el año 2016 la empresa YPFB Chaco S.A. llevó adelante la perforación del pozo Caigua 1002D en la Sierra de Aguarağüe del Subandino Sur de Bolivia. La columna estratigráfica atravesada fue datada con palinología con sorprendentes resultados, por haber alcanzado niveles ludloviano-bridolianos en cotas estructurales muy altas. La metodología de datación a detalle mediante la palinología de un pozo exploratorio ha permitido llevar un control inusualmente constante en una columna de más de 4300 metros. El establecimiento de la estratigrafía tanto de superficie como de subsuelo y las líneas tiempo con baja incertidumbre, permitió reconstruir el pliegue con datos estructurales de dips del pozo. Esta integración de la información, fue fundamental para comprender que el modelo perforado distaba de ser un modelo "clásico" de láminas superpuestas. Se consideró en el modelo de deformación propuesto, que se tienen dos niveles incompetentes, la Fm. Los Monos (Eifeliano – Givetiano) y la Fm. Kirusillas (Ludloviano-bridoliano). Interpretar las capas del fondo del pozo como capas rebatidas, respetando las líneas tiempo de palinología, así como los dips, permite plantearse nuevos desafíos en la generación de modelos análogos para comprender la deformación de la sierra más al este del Subandino.

Palabras clave: Geología Estructural, Modelo de deformación, Dataciones palinológicas de pozo, Pozo Caigua 1002D

INTRODUCCIÓN

Los resultados obtenidos del estudio de los pozos Caigua 1001D y Caigua X-1002 en la construcción del pliegue perforado en Aguarağüe (**Fig. 1**), ha permitido por tercera vez (Pozo Cumandairenda –X1 ST, Andina – Repsol YPF, 2004; y Pozo Ramos Profundo 1012, Hernández *et al.*, 2011) nuevas consideraciones sobre los modelos estructurales a esperar en la faja plegada y corrida de los Andes Centrales.

NIVELES REOLOGICOS Y COLUMNA ESTRATIGRAFICA INVOLUCRADA EN LA DEFORMACION

Son cuatro los niveles reológicos o pisos estructurales, el I desde el Ordovícico al techo pelítico de la Fm. Kirusillas. El II, entre la base de la progradación bridoliana de la Fm. Tarabuco hasta las arenas eifelianas y/o emsianas de la Fm. Huamampampa. El III, son las pelitas incompetentes eifelianas y givetianas de la Fm. Los Monos y el IV, el resto de la columna, es decir desde el Frasniano al Pleistoceno.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL EN 2D

La construcción de cortes estructurales balanceados en un sector parcial de la faja plegada y corrida libera las posibilidades del método a una cantidad de alternativas no deseadas. Se tomaron las restricciones de un corte regional (**Fig. 1**) desde la estructura inmediatamente al oeste del *trend* estructural de interés hasta la zona indeformada del Chaco boliviano con un modelo de deformación alternativo e integrado en el programa Andino 3D desarrollado por GEOMAP S.A. con el IDEAN de la Universidad Nacional de Buenos Aires y el Ministerio de Ciencia y Técnica de la Nación Argentina hoy parte de la empresa LA TE ANDES S.A. (Geomap-Conicet). Los tres modelos analizados consisten en lo interpretado en el corte de Caigua a) dos "láminas" de *fault-bend-fold* acompañado de *fault-parallel-flow* y/o con *Trishear* (Hardy y Ford, 1997) o b) una sola lámina de *fault-bend-fold* acompañado de una propagación *trishear* cuyo

acortamiento es emergente desde el nivel de despegue basal (modelo perforado en el pozo Ramos del Noroeste Argentino) y c) la construcción de un pliegue de propagación cinemático por *trishear* transportado por *fault-parallel-flow*. Estos tres casos fueron reconstruidos por el método de “longitudes estratales” (ANDINO 3D 2015), y la restitución de *trishear* por el área original antes de aplicarle la deformación por *forward modeling* (Andino 3D 2015).

Se han intentado establecer restricciones geométricas a fin de poder acotar las variables involucradas:

- Cada lámina del piso estructural inferior restituye a un “*pin line*” en general normal a los estratos (sin cizalla) o con oblicuidad homogénea.
- El acortamiento total involucrado en el corte, independiente del modelo involucrado tiene un porcentaje similar a los regionales publicados desde el interandino hasta la plataforma indeformada y consistente entre sí con los cortes publicados por Dunn *et al.*, (1995), Starck, (1999), Giraud *et al.*, (1999), Hernández *et al.*, (2002).
- El tiempo de deformación asignado a cada falla, a cada pliegue o a cada transporte de pliegue es consistente a lo largo de los mismos.
- Los ángulos de corte de las fallas en secuencia tienen un ángulo de ruptura original no mayor a 30°, solo en condiciones excepcionales pueden llegar a 35° o 60° o cuando las fallas son reactivadas en situaciones de fuera de secuencia sobre estratos de alto ángulo o bien el plano de falla es plegado por la cizalla que genera una deformación posterior.
- Los ángulos de corte son menores donde los coeficientes de fricción interna de la roca son menores (pelitas).
- En función de las determinaciones del acortamiento del piso estructural inferior respecto al superior se realizó un análisis de las variables. Se dejó fija o se cuantificó la transferencia de acortamiento hacia adelante del piso estructural superior y en función de ello se analizaron las posibles soluciones alternativas tanto para el piso estructural inferior como superior.

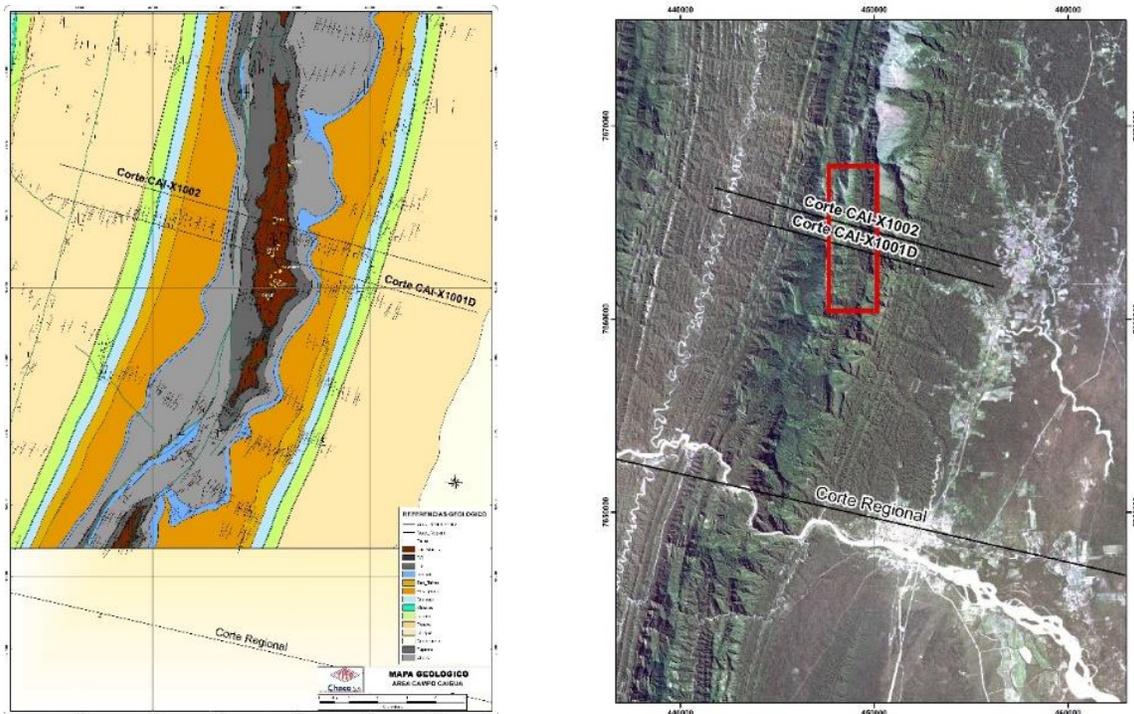


Figura 1. Mapa Geológico compilado por YPFB Chaco S.A. y ubicación de los cortes realizados en el Campo Caigua (izquierda). Misma ubicación sobre la imagen satelital (derecha).

Sin duda por la cantidad de oportunidades exploratorias que genera el menor espesor de una columna involucrada en la deformación y por la necesidad de incluir repeticiones de los reservorios para llegar a la misma cota estructural, es más optimista al colocar en la construcción de los cortes el nivel de despegue en la base de la Fm. Kirusillas y llegar a las cotas de los reservorios por apilamiento estructural. Los autores consideran que en este aspecto el Pozo Ramos profundo xp-1012 (Hernández *et al.*, 2011), da un importante diagnóstico negativo para esta modelización de apilamientos del piso estructural inferior, con lo cual es necesario replantear los modelos de deformación involucrados en la faja plegada Subandina; no obstante lo que se cambia es una forma de incorporar reservas que hasta hoy no ha dado éxito, por otra que generará seguramente un mejor desarrollo de inversiones exitosas.

Las litologías involucradas en la deformación subandina van cambiando a medida que nos vamos hacia el oeste y hacia el sur no solo por hacerse el piso estructural intermedio Eifeliano - Givetiano más proximal sino también porque el Devónico es erosionado por el Carbonífero en diferentes posiciones.

El acortamiento transmitido en el Devónico Superior por el límite Eifeliano – Emsiano (base Fm Los Monos en San Alberto, Macueta, Ramos y Bermejo) es generalizado en el Subandino Oriental y comprobado también en esta posición del yacimiento Caigua por la falla Caigua del pozo 1001 y 1001D que repite la Fm Huamampampa (aquí de edad givetiana), pero que suponemos su despegue del acortamiento transmitido desde la estructuración de San Antonio al oeste, por la inundación pelítica de la base del Eifeliano-techo Emsiano. Lo mismo sucede en los pozos Margarita y en Balapuca. Existen posiciones del Subandino Occidental donde el acortamiento transmitido se desarrolla en el Devónico Inferior o en el Carbonífero o Triásico y no en el Devónico Superior (Dunn *et al.*, 1995, XR s.r.l. 1999). Es en parte por esto que los niveles pragiano-emsianos y eifelianos están tan altos estructuralmente en los pozos Ñau x-2, Huayco x-1, Margarita x-1 e Isiri x-1, respecto al Devónico de posiciones más orientales. Para resolver esta variable es fundamental encontrar el modelo estratigráfico-paleogeográfico que corresponda a la estructura a perforar y en su defecto reflejarlo en el riesgo geológico en profundidad.

Existen varios preconceptos que habría que observar como restrictivos de los modelos de deformación subandinos:

- 1) uno de ellos es que las estructuras de faja plegada son estructuras anticlinales extensamente alargadas, donde el petróleo y/o el gas se encuentra en sus fisuras crestales o de su ante inclinación. Los siguientes ejemplos reales prueban la inexistencia de esta continuidad supuesta al menos en la longitud esperada. Se trata del Campo Aguarañe respecto al Campo Los Monos o Sanandita, o bien la estructura de San Pedrito respecto a Macueta, o finalmente la estructura de Ramos y Margarita respecto a Ñiguazu o Churumas.
- 2) que el nivel de despegue superior es exclusivamente por la base de la Formación Los Monos. Estructuras como Domo Tarija, Margarita, Huayco o bien la del Río Iruya, son pruebas de lo contrario.
- 3) que el Ordovícico no está involucrado en el Subandino Occidental. Esto es falso desde el momento en que se observó el cubo sísmico en Huayco y Margarita.
- 4) que el ángulo de despegue basal es constante.
- 5) que las fallas fuera de secuencia se propagan por los mismos niveles y con el mismo ángulo de despegue que las fallas en secuencia a lo largo de toda la faja plegada subandina.
- 6) el concepto de las cuñas de techo pasivo a fin de balancear cada estructura en sí mismo.
- 7) que la superficie basal es una “tabla” por donde se mueve todo el Subandino desconociendo todo tipo de deformación preandina en la deformación.
- 8) que la deformación de todos los niveles estratigráficos menos la Fm Los Monos, para algunos autores, se desarrolla casi exclusivamente por medio de plegamientos por flexión o propagación de falla y que la compensación de la cizalla por el plegamiento es debido a cizalla interestratal desconociendo la posibilidad de la deformación difusa en cualquier nivel que no sea Los Monos. Los autores piensan que la Formación Kirusillas, salvo por la injerencia del incremento de la presión poral por generación de la materia orgánica, está en igual o mejores condiciones de presentar deformación isótropa.
- 9) Estas observaciones no tienden a sostener que no existan los modelos aplicados hasta este trabajo, sino que deben ser utilizados con precaución. Existen incongruencias que se han observado a nivel de la estructura de Ramos en Argentina, como que el “abultamiento” mayor de la Formación Los Monos se encuentra en el hundimiento de Huamampampa o bien que el abultamiento mayor en el campo

Caigua estando la estructura de Huamampampa más baja que en el campo Los Monos con menor abultamiento de esta unidad homónima.

MODELO DE DEFORMACION

El modelo de deformación que se presenta es una variante alternativa con la que XR-GEOMAP ha venido trabajando los últimos 10 años, con un modelo de propagación de falla transportado sobre el yaciente sin Ordovícico involucrado en la deformación, con ángulo de despegue variable localmente en más o menos 1.7 grados. A partir del corte estructural se conoce que el acortamiento ingresado por el límite Eifeliano - Emsiano en el desarrollo del "protoanticlinal de Aguara güe" es de 2500m. Este acortamiento está distribuido en estos dos modelos entre las fallas que conforman el crecimiento del piso estructural III.

El acortamiento regional emergente hacia la estructura de Mandeyapeca o Madrejones - Las Vertientes es de 7000m en el modelo A por la información sísmica del campo Caigua, sin embargo difícilmente pueda tener más de 2000m por la información sísmica existente de la zona menos deformada al este del campo Los Monos. El acortamiento general a lo ancho del Subandino sur está en el orden del 33%

Corte estructural Pozo CAI 1001D con doble apilamiento del piso estructural I y II más crecimiento final por incremento del coeficiente de fricción frontal por propagación por trishear.

Este corte posee buena información de subsuelo y superficie ya que tiene incorporada los siguientes tópicos: 1) los registros del pozo Caigua x-1001D, 2) el mapeo de geología de superficie cuyas definiciones formales en el Carbonífero deberían ser mapeadas con detalle y 3) la sección sísmica 25BR96 en tiempo.

Se realizó la construcción del corte con una superficie de despegue basal plana de 2.33° a una profundidad de -8448 mbnm por debajo del Anticlinal Aguara güe en superficie.

La falla Aguara güe presenta un rechazo por la línea de falla de 920 m provenientes del acortamiento transferido o emergente del *fault-bend-fold* del piso estructural I que forma el Anticlinal de San Antonio (Falla 4 con aprox. 4000 m de transporte) a este rechazo se le suma el de la falla axial de Aguara güe con 490 m.

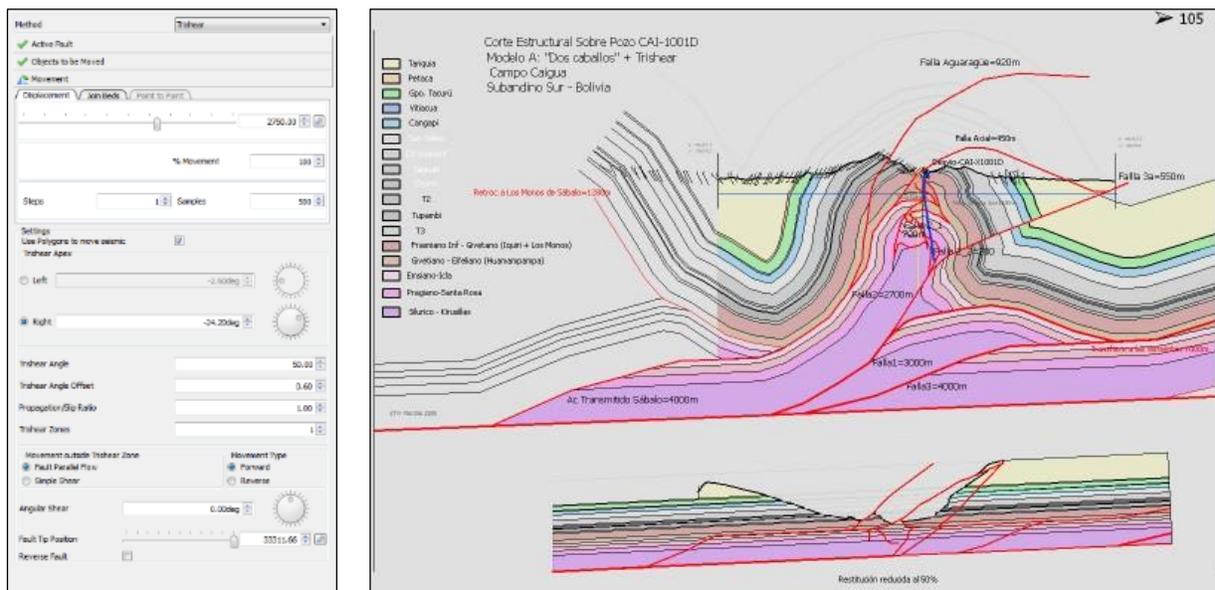


Figura 2. (Izquierda) Parámetros del movimiento por *trishear* de la falla 2 en Corte Estructural Modelo A (Derecha). La restitución está al 50% de la escala del corte geológico.

El desplazamiento de la falla emergente "La Oculta" inmediatamente al este del pozo Caigua 1001 con 1100 m es una falla de techo pasivo emergente de acortamiento transferido de Sábalo o bien de la falla 1. La estructura de Aguaragüe se construyó por medio de un acortamiento ingresado de 10500 m por la falla basal, los cuales se distribuyen en 3000 m de la rampa de yaciente 1, 4000 m de la rampa de yaciente 3 y 2700 m que genera por medio de propagación "trishear" 2 (**Fig. 2**). Posteriormente a la falla 3, se genera un "breakthrough" frontal (falla 3a) de 550 m. De todo este acortamiento 5900 m continúan a formar parte del crecimiento del piso estructural III y IV del tren estructural de Mandeyapeca - Las Vertientes - Madrejones. Esta geometría y cinemática descrita, si bien posible, es una forma de discretizar una solución del exceso de área por acortamiento en el núcleo de la estructura que soporta la información tomada como base sólida de datos (superficie, línea sísmica y pozo). Si se analizan algunos pozos aislados que han atravesado el núcleo de estas estructuras con trayectorias de bajo ángulo, como es el pozo Cumandairenda x-1 ST, muestra un Huamampampa plegado con capas normales y rebatidas con alta frecuencia en su plegamiento interno.

La información disponible por medio de los pozos perforados no permite determinar el comportamiento de las estructuras fuera de la posición frontal salvo excepciones como el pozo Cumandairenda x-1 ST en el cual, por una necesidad exploratoria se generó un *side track* con bajo ángulo que mostró el grado de complejidad de esa deformación del Emsiano-Eifeliano y pre-Emsiano.

Sincrónico con la falla 2 de 2700 m de deslizamiento y considerando una superficie de cizalla pura que limita la deformación *trishear* de la deformación inferior respecto al plegamiento por flujo paralelo a la falla emerge para compensar esa diferencia la falla 2_1 de 790 m de acortamiento.

Este modelo de deformación tiene el beneficio de respetar los datos del Modelo Ramos de capas rebatidas en el bloque bajo y además sigue generando la expectativa exploratoria de:

- 1) la "lámina intermedia" generada por la falla 3 a una profundidad de 5500 m desde superficie para encontrar los reservorios de Huamampampa,
- 2) encontrar diferentes láminas de Huamampampa eifeliano separadas por pelitas givetianas como sucede en el campo Margarita pero con otro tipo de modelo de deformación al interpretado por Repsol, tanto por arriba de la tabla de agua del campo en producción, como de reservorios independientes.
- 3) capas verticales a rebatidas en el bloque bajo de fallas como la Falla 2-2a. Se aclara que en la Argentina muy cerca de la frontera existen campos productivos de los bloques bajos de estas fallas en el Anticlinal Aguaragüe que dejan capas verticales a rebatidas por debajo. (Lomitas bloque bajo y Campo Durán bloque bajo en el tren estructural Madrejones). Si el reservorio es Huamampampa Emsiano o Huamampampa Eifeliano, Carbonífero o Tranquitas depende del rechazo de la falla 2a o bien del estiramiento que se produce en estas unidades según los parámetros de *trishear*, los cuales influyen también, obviamente, en la diferencia de acortamiento entre la zona afectada por *trishear* y la afectada por plegamiento por flujo paralelo a la falla (Falla 2_1 en el modelo).

La explicación teórica de las fallas 2_1 y la existente en el límite Tarabuco-Santa Rosa es la siguiente: La aplicación de este *trishear* (**Fig. 3**) de 6000 m se aplicó desde la base del piso estructural 1 y utilizando la base del Pragiano o Lochkoviano como una falla pasiva (**Fig. 3**) con lo cual se genera una cizalla del orden de los 1000 m que resolvimos como dice el caso 1 de la Fig. 3 y como se interpretó la falla 2_1 de Caigua Modelo A con 790m de acortamiento. Es posible que el exceso de longitudes estratales en el nivel reológico II se resuelva parcialmente por fallamiento normal en la cresta de la estructura en los niveles competentes de Santa Rosa y Huamampampa (no dibujados en la figura 3). En caso que este anticlinal se transportara unos 2000m hacia el oriente permitiendo generar el caso c. expresado en párrafo 1 del acápite "Modelo estructural 2D"

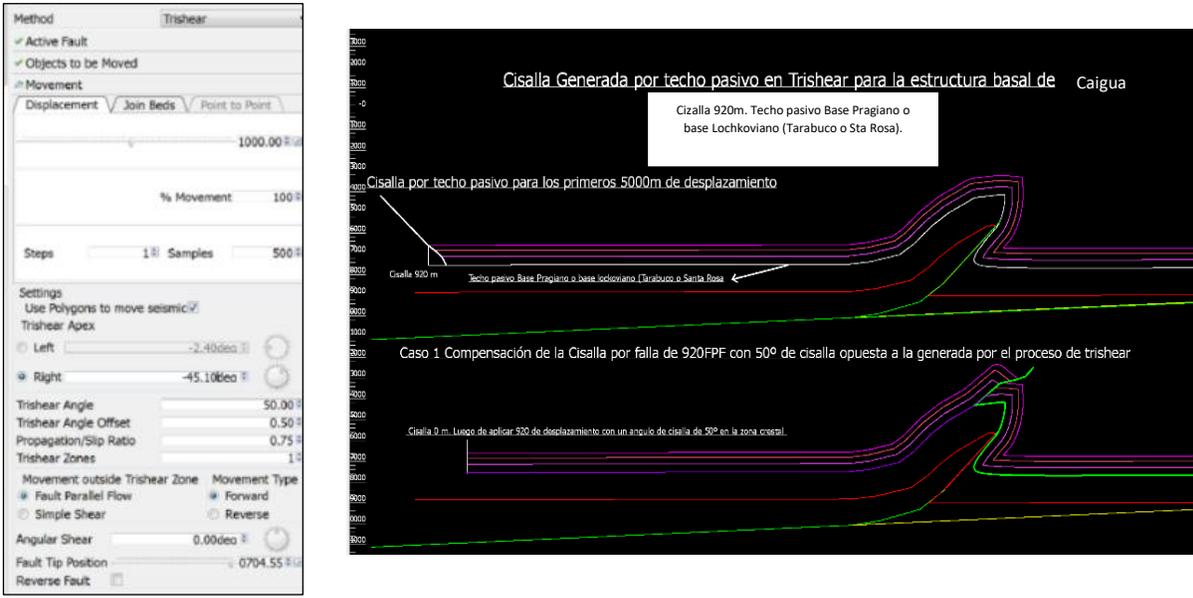


Figura 3. Izquierda: *Trishear* de la Falla 2 aplicado 6000m para conseguir la deformación del piso 2 final de la estructura de Caigua. Derecha: Esquema del comportamiento de una falla pasiva que limita los diferentes estilos de la misma. Falla en verde que corta el piso estructural II.

El resultado final de este razonamiento se plasma en el corte elaborado en base al resultado de la perforación del CAI-X1002, con el mismo criterio de datos de superficie y palinológicos (Fig. 4):

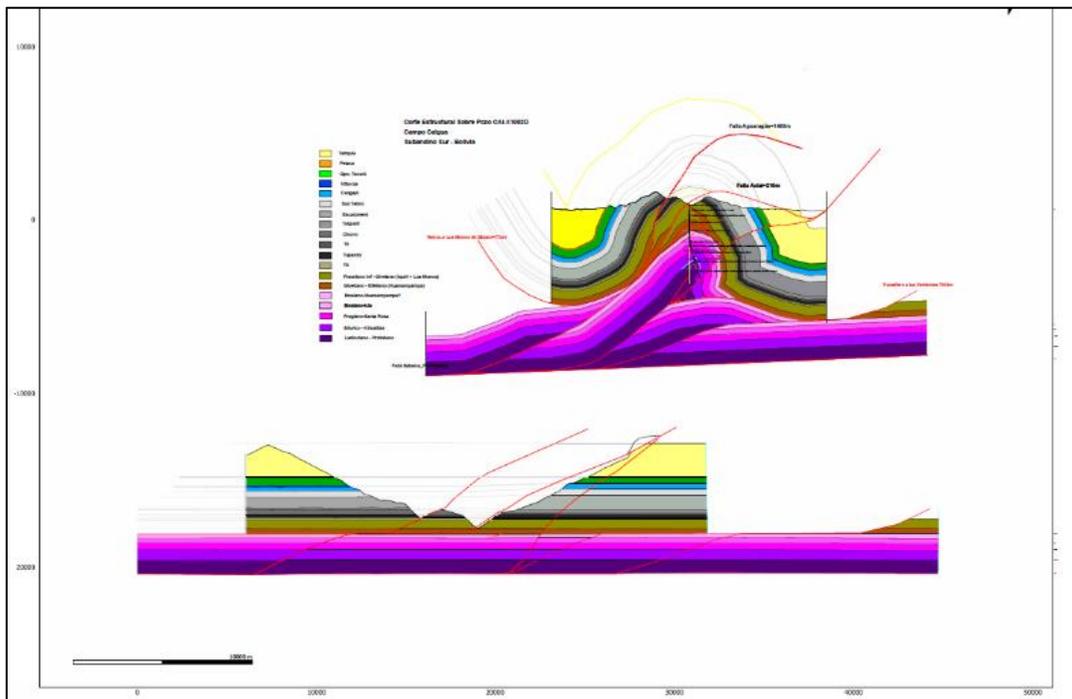


Figura 4. Modelo ajustado a los datos de la perforación del pozo CAI-X1002.

REFERENCIAS

- ANDINA S.A., REPSOL YPF, 2004.** Informe Geológico Final. Pozo Cumandairenda –x1 ST, (CMD-X1 ST). Informe interno inédito. 291 pgs.
- Dunn, J.F., Hartshorn, K.G. y Hartshorn, P.W.1995.** Structural styles and hydrocarbon potential of the Sub-Andean thrust belt of southern Bolivia. En Tankard, A.J., Suárez Soruco R. y Welsink, H.J. (eds.) Petroleum basins of South America, American Association of Petroleum Geologists Memoir 62: 523-453.
- Giraudó, R., Limachi, R., Requena, E., Guerra, H. 1999.** Geología estructural de las regiones subandina y de piedemonte entre los 18° y 22°30' lat. Sur, Bolivia. Un nuevo modelo de deformación. 4º Congreso de Exploración y desarrollo de hidrocarburos (Mar del Plata), Actas: 405-426.
- Hardy, S., Ford, M. 1997.** Numerical modeling of trishear fault-propagation folding. Tectonics 16: 841-854.
- Hernández, N., Iribarne, M., Apreada, 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. 8º Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, IAPG. Trabajos Técnicos. Mar del Plata, Argentina.
- 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. 5º Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos. Mar del Plata. Argentina. 25 pgs.
- Starck, D. 1999.** Los sistemas petroleros de la Cuenca de Tarija. 4º Congreso de Exploración y desarrollo de hidrocarburos (Mar del Plata), Actas: 63-82.
- 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.