

Modelo análogo de fallamiento extensional y comparación con el sistema de fallas normales Las Salinas, provincia del Neuquén

Berenice PLOTEK¹, Cecilia GUZMAN¹ y Ernesto CRISTALLINI²

¹Laboratorio de Modelado Geológico (LaMoGe), Instituto de Estudios Andinos "Don Pablo Groeber" (IDEAN), Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires-CONICET.

²CONICET - LaTe Andes S.A.

Email: bereplotek@gmail.com, ceciliagguzman@hotmail.com, ecristallini@gmail.com

Editor: Fernando Hongn

RESUMEN

Se realizó una serie de modelos análogos con el objeto de analizar el comportamiento del sistema de fallas normales denominado Las Salinas ubicado en el flanco occidental del Dorso de los Chihuidos, Neuquén, Argentina. A partir de la digitalización de cortes seriados de estos modelos, se confeccionaron cubos 3D que permitieron analizar las estructuras desarrolladas en los distintos modelos análogos. Gracias a esta técnica fue posible visualizar los diferentes estadios de evolución de un sistema de fallas normales y realizar una comparación con el prototipo en el campo neuquino. Es posible concluir que en las etapas más avanzadas de los experimentos aquellas estructuras que presentan una aparente continuidad en su análisis en planta, son el resultado de la interacción de fallas menores que se conectan a medida que avanza la extensión. De la comparación entre modelos y prototipo de campo, se propone que el fallamiento normal Las Salinas responde a un modelo de estructuras en dominó, desatado a partir de la movilidad de evaporitas a baja profundidad y la pendiente regional dada por el flanco oeste del Dorso de los Chihuidos.

Palabras clave: *Modelado geológico, Fallas normales, Cuenca Neuquina.*

ABSTRACT

Analog model of extensional faults and comparison with the zone of tension Las Salinas, Province of Neuquén.

To study the system of normal faults "Las Salinas" in the western flank of the Chihuidos high, Neuquén, Argentina, analogue models were performed. From digitalized serial sections of these models it was possible to develop a 3D box using the Software Andino 3D. This program allows to observe the generated structures and follow the different phases of evolution of the normal faults. We compared them with the prototype in the Neuquén Basin, concluding that the normal faults that present an apparent continuity at the end of the experiment are the result of the linkage of overlapping minor faults segments that interact while the extension increases. Moreover, we propose that normal faulting in the area responds to a model of structures in domino, generated due to the migration of salt located at low depth and the regional slope given by the western flank of the Chihuidos high.

Keywords: *Geological modeling, Normal faults, Neuquén Basin.*

INTRODUCCIÓN

El modelado análogo tiene como objetivos principales reproducir mediante experimentos escalados en un laboratorio procesos geológicos para su observación y posterior estudio. Estos procesos, tienen en la naturaleza múltiples causas, diversos mecanismos y una compleja historia

de evolución, motivo por el cual no resultan sencillos de comprender. En muchos casos, los modelos análogos plantean simplificaciones que permiten analizar mejor las diferentes fases de construcción de una estructura (Schellart y Strak 2016). A su vez, y a diferencia de los casos que ocurren en la naturaleza, el modelado análogo tiene como principal ventaja la

capacidad de documentar cada uno de los diferentes estadios de la historia evolutiva de una estructura, permitiendo su comparación con el resultado final (Vidal *et al.* 2008). Básicamente, es una técnica experimental que permite estudiar los procesos geológicos a partir de la construcción y análisis de modelos a escalas geométrica y cinemática reducidas (Corti 2005).

Con el objetivo de analizar el desarrollo de las fallas normales, se llevaron a cabo una serie de experimentos análogos en el Laboratorio de Modelado Geológico (LaMo-Ge UBA-CONICET) y sus resultados se compararon con la geometría de la zona Las Salinas en el norte de la provincia del Neuquén. Este juego de fallas normales se ubica en el flanco occidental del Dorso de los Chihuidos y al este del anticlinal Huitrín, entre los paralelos 37°48'48,31" y 37°42'5,36" de latitud sur. Dicha área limita al oeste con la faja plegada y corrida del Agrio y cuenta con afloramientos cretácicos expuestos haciendo posible el estudio de las unidades principales. En particular, las fallas afectan en superficie a las Formaciones Rayoso (Herrero Ducloux 1946) y Candeleros (Di Paola 1973).

En este trabajo el modelo análogo presentado reproduce fallas normales en un sistema extensional con un nivel de despegue. El análisis del mismo permitió una mejor comprensión de las fallas normales.

RESEÑA DE LA CUENCA NEUQUINA

La Cuenca Neuquina es una de las principales cuencas productoras de hidrocarburos de nuestro país. Se ubica al este de los Andes, abarcando las provincias de Mendoza, Neuquén, el oeste de Río Negro, el sur de La Pampa y sur de San Juan. Su registro estratigráfico posee espesor variado de acuerdo a la zona, alcanzando hacia el centro de la cuenca unos 6.000 metros (Legarreta 1985, Howell *et al.* 2005). Posee un origen poligenético (Cobbold *et al.* 1999). Hacia fines del periodo Triásico, el margen oeste de América estuvo sometido a extensión producto de la ruptura del supercontinente Pangea. Esto generó una etapa de sinrift, desarrollándose sobre el basamento depósitos epiclásticos y volcánicos del Triásico Tardío al Jurásico (Gulisano *et al.* 1984). La subducción surge durante el inicio del periodo Jurásico, con la fragmentación del Gondwana Occidental del Oriental. Desde el Jurásico Temprano al Cretácico Temprano, su evolución se caracteriza por una etapa de postrift. Los hemigrábenes se fueron intercomunicando, mientras la subducción desarrollaba al arco magmático.

Hacia el Kimmeridgiano ocurre una fuerte continentalización de la cuenca, que quedó representada en los depósitos continentales de la Formación Tordillo (Groeber 1946). Con esta unidad se inicia el ciclo Ándico, y a su vez, marca la base del Grupo Mendoza (Stipanovic *et al.* 1968). En el Dorso de los Chihuidos, el primer evento compresivo data del Jurásico Tardío y queda registrado por la disminución del espesor en la Formación Vaca Muerta (Zamora Valcarce *et al.* 2009). El ciclo Ándico culmina con sedimentos continentales y marinos restringidos del Grupo Bajada del Agrio (Méndez *et al.* 1995), integrado por las Formaciones Huitrín y Rayoso. A partir del Cretácico medio ocurre un nuevo evento compresivo, donde se habría estructurado gran parte de la faja plegada y corrida del Agrio. Entre los 100 a 73 Ma se instauró el arco volcánico en el sector interno de la faja (Zamora Valcarce *et al.* 2009). Hacia el Cretácico Tardío, se depositan los estratos rojos característicos del Grupo Neuquén, que marcan el inicio de la fase de antepaís. En esta etapa, domina la compresión asociada a la zona de subducción en el margen occidental. A su vez, se desarrolla un importante arco magmático y se registra una alta tasa de subsidencia en la cuenca (Garrido 2010). Esto, facilitó el ingreso del océano Atlántico y la depositación de los estratos de origen marino que conforman el Grupo Malargüe.

Según Ramos y Folguera (2005), la zona

de subducción sufrió, entre el Cretácico Tardío y el Paleógeno, una somerización acompañada de una expansión del arco hacia el este e importante engrosamiento cortical. Para el Paleógeno, diversos autores consideran que la faja plegada y corrida del Agrio ya se encontraba estructurada. Hacia el Eoceno Temprano, las curvas de subsidencia tectónica sugieren un fuerte levantamiento en la zona del Dorso de los Chihuidos (Cristallini *et al.* 2005).

Una fase extensional oligocena, que perdura hasta el inicio del Mioceno, afectó la faja plegada y corrida desarrollada hacia fines del Cretácico (Mescua *et al.* 2013). Hacia el Mioceno medio, ocurre un nuevo evento compresivo en la zona del Dorso de los Chihuidos, siendo responsable de la estructuración que se observa en la actualidad (Zamora Valcarce *et al.* 2009). El último evento de alzamiento estaría coincidiendo con el emplazamiento del aparato volcánico fisural del complejo Auca Mahuida, hace siete millones de años aproximadamente (Sigismondi 2012).

El Plioceno se inicia con un pulso extensional que perdura hasta el límite con el Cuaternario Temprano. Fueron propuestos cambios en las condiciones del sistema subductivo, en particular reorganizaciones en la interacción entre el sistema de placas Pacífica y Sudamericana para explicar estos eventos (Somoza *et al.* 2002). La última fase de construcción orogénica se registra hacia el Cuaternario.



Figura 1. Ubicación de la zona de estudio señalada en el recuadro rojo. Hacia el oeste se localiza la faja plegada y corrida del Agrio mientras que hacia el este se encuentra el Dorso de los Chihuidos. La línea punteada representa el límite entre ambas regiones morfoestructurales.

MARCO ESTRUCTURAL

La zona donde se llevó a cabo el trabajo de campo se encuentra enmarcada al oeste por la faja plegada y corrida del Agrio, limitando al este con el anticlinal del Dorso de los Chihuidos (Fig. 1). En ella se distinguen una serie de plegamientos que incluyen al cerro Rayoso, al anticlinal Huitrín y al sinclinal del Río Neuquén. El frente orogénico actual se encuentra ubicado hacia el oeste, como lo señalan diversos autores (Gianni *et al.* 2014, Folguera *et al.* 2011). La faja plegada y corrida se divide en dos sectores de acuerdo al estilo estructural, uno interno donde se ve involucrado el basamento y otro externo, en donde los pliegues despegan a partir de niveles salinos o pelíticos de las Formaciones Auquilco, Vaca Muerta, Agrio y Huitrín (Zamora Valcarce *et al.* 2007). Incluso en el sector con deformación predominantemente epidérmica, el basamento se encuentra parcialmente involucrado (Zamora Valcarce *et al.* 2009).

Los primeros eventos compresivos de la faja plegada y corrida del Agrio fueron situados desde mediados a fines del Cretácico, y corresponden a la inversión tectónica de hemigrábenes triásicos. De esta forma, se fue estructurando el sector interno de la faja, con participación de basamento. Se estima que existen a su vez estructuras epidérmicas generadas en este evento (Zapata *et al.* 2002). La edad de deformación se encuentra datada a partir de estudios sobre rocas ígneas, que intruyen sedimentos cretácicos previamente deformados. De esta forma, se proponen varios pulsos de estructuración entre los 100 y 73 Ma (Kay *et al.* 2006, Zamora Valcarce *et al.* 2009). A su vez el Grupo Neuquén apoya discordantemente sobre la Formación Rayoso, delimitando la discordancia Patagónica, que se atribuye a movimientos hacia el Cenomaniano temprano (Leanza 2009). Asimismo, la configuración de la Formación Candeleros, con su granulometría de mayor tamaño que las unidades previas y la presencia de abanicos terminales, señalan el inicio del antepaís en la cuenca y la proximidad con el frente orogénico (Sánchez y Asurmendi 2015). Hacia el Mioceno ocurre un nuevo evento de deformación, donde conglomerados sinorogénicos son la evidencia de



Figura 2. Ubicación de la zona de estudio. Imagen de la zona de Las Salinas y parte del flanco occidental del Dorso de los Chihuidos con las principales estructuras mapeadas. La transecta roja representa la ubicación del perfil realizado.

reactivación estructural (Zamora Valcarce *et al.* 2009).

Hacia el área de estudio se presentan afloramientos de los Grupos Bajada del Agrio y Neuquén. En particular, el anticlinal Huitrín afecta a los estratos de las Formaciones Rayoso y Huitrín. En sus flancos es posible identificar a los diferentes miembros de la Formación Rayoso, mientras que en su centro la erosión es importante y permite distinguir un núcleo con predominancia de material salino, rodeado de rocas clásticas de la Formación Huitrín (Fig. 2).

Esta estructura generada bajo un régimen compresivo presenta al este de su limbo oriental un juego de fallas normales identificado como la zona de tensión Las Salinas (Ramos 1981). Este fallamiento se evidencia a partir de valles de rumbo N-S, que llegan a tener 10 km de largo y hasta 1 km de ancho delimitados por escarpas pronunciadas que generan un importante desnivel topográfico (Fig. 2).

Estas fallas normales, fueron activas durante el Plioceno en base al análisis de la geomorfología del sector (Messenger *et al.* 2014). La última fase de construcción orogénica se registra hacia el Pleistoceno medio, quedando evidenciada por la morfología de los depósitos aluviales del río Neuquén (Messenger *et al.* 2010).

Las primeras investigaciones sobre el origen de estas estructuras, las relacionan con el fallamiento de rumbo provocado por

el lineamiento Cortaderas, situado al norte (Ramos 1981). Otros autores atribuyen la presencia de estas fallas a procesos gravitatorios en la pendiente del alto regional dado por el Dorso de los Chihuidos (Messenger *et al.* 2014).

En cuanto a la evolución del Dorso, se propone que el levantamiento responsable de su configuración actual ocurre hacia el Neógeno pero que los primeros movimientos compresivos se dieron en el Cretácico Temprano (Mareto y Pángaro 2005). La estructura actual del Dorso de los Chihuidos se vincula a un proceso de rebote cortical por desvinculación de la corteza oceánica (Cristallini *et al.* 2005). Otros autores sostienen que el anticlinal surge a partir de la inversión de hemigrábenes precuayanos (Zamora Valcarce *et al.* 2009).

DESCRIPCIÓN DE LAS UNIDADES AFLORANTES

En la zona se ubican depósitos del Grupo Bajada del Agrio y de la Formación Candeleros, integrante basal del Grupo Neuquén. El Grupo Bajada del Agrio comprende a las sedimentitas que se encuentran entre la Formación Agrio y la Formación Candeleros. Originalmente recibía el nombre de Grupo Rayoso (Uliana *et al.* 1975a, b). Esta nomenclatura fue reemplazada por Grupo Bajada

del Agrio, propuesta de Méndez *et al.* (1995). Presenta amplio desarrollo en la cuenca Neuquina, siendo integrado por las Formaciones Huitrín y Rayoso. En este trabajo se sigue la división establecida por Leanza (2003), en la que la Formación Huitrín cuenta con los Miembros Troncoso, La Tosca y Salina. Esta formación aflora en el anticlinal homónimo, encontrándose hacia el núcleo de la estructura. Se distingue un sector central con predominio de rocas evaporíticas y hacia el sector periférico se ubican rocas clásticas.

La Formación Rayoso, por su parte, se divide en cuatro miembros. Se inicia con el Miembro Rincón el cual se deposita en paraconcordancia con el Miembro Salina de la Formación Huitrín. Puntualmente, se lo observa hacia el cierre sur del anticlinal Huitrín con afloramientos de gran continuidad lateral. Se encuentra representado por una sucesión de areniscas castañas y fangolitas, donde las evaporitas se presentan de forma subordinada. Esta unidad se encuentra cubierta en concordancia por el Miembro Quilimalal, en el cual predominan los depósitos de fangolitas bandeadas con intercalaciones de yeso y anhidrita. Estas sedimentitas se han depositado en un medio de agua panda periódicamente sujeto a exposición subaérea (Uliana *et al.* 1975a, Leanza 2003).

El Miembro Pichi Neuquén finaliza la secuencia en el sector mapeado ya que el Miembro Cañadón de la Zorra no aflora en la zona. Se compone de areniscas rojas medianas a finas. El contacto con el Miembro Quilimalal es concordante, mientras que su tope se encuentra delimitado por la discordancia Patagónica. La Formación Candeleros (Di Paola 1973) se encuentra en discordancia angular y/o erosiva sobre la Formación Rayoso, presentando un espesor de hasta 200 m. Aflora en buena parte del área de estudio, con extensos afloramientos a ambos lados del anticlinal Huitrín. Se caracteriza por potentes bancos de areniscas y conglomerados, con menor participación de fangolitas. Al respecto de su ambiente depositacional, corresponden a cursos fluviales con fuerte migración lateral lo que explicaría los cuerpos arenosos multiepisódicos (Leanza *et al.*

2005). Otros autores proponen abanicos terminales (Sánchez y Asurmendi 2015).

DESCRIPCIÓN DE LA SECCIÓN ESTRUCTURAL

Con el objetivo de ilustrar la estructura de la zona de tensión Las Salinas, se realizó una sección estructural (Fig. 3) basada en un relevamiento topográfico detallado (Fig. 2), en la toma de datos geométricos y la información de subsuelo analizada. Se recorrieron un total de 7 lomadas desde el este hasta el sector central del anticlinal. En principio, se postulaba que cada lomada es el resultado de un fallamiento que afecta en superficie a las Formaciones Rayoso y Candeleros. Las fallas tienen aproximadamente 65° de inclinación, con geometría planar.

La primera falla inclina hacia el este y afecta a los estratos de la Formación Candeleros en superficie. Por su parte, no se visualiza a la Formación Rayoso en la lomada. En la segunda lomada desde el este los estratos presentan valores de inclinación muy superiores, y en ella, la falla 2 no aflora. Por esta razón se interpreta como un plegamiento de propagación de

falla normal de cizalla triangular (Erslev 1991). Se identifica a su vez la existencia de un sinclinal de flancos suaves y amplios, que no es fácilmente visible en el campo. El pliegue queda comprendido entre la falla 2, que inclina en dirección oeste y la falla 3, que lo hace al este. La falla 4 afecta los estratos de la Formación Candeleros e inclina hacia el oeste, al igual que las estructuras posteriores. Hacia el oeste del perfil se ubican las fallas 5 y 6, parcialmente cubiertas, que exponen sedimentitas del Miembro Quilimalal. En la falla 5 y 6 fue posible medir el rechazo ya que se observa, en ambos bloques, a dicho miembro. Los restantes rechazos no pudieron ser medidos en el campo.

El anticlinal Huitrín se origina a partir de una falla inversa que afecta a los estratos de la Formación Agrio (Messenger *et al.* 2014). Toda la zona muestra una inclinación regional hacia el oeste producto del flanco occidental del Dorso de los Chihuinos.

En los relevamientos se identificaron posibles zonas de transferencia donde se ubican las rampas de relevo que conectan los segmentos menores de las fallas normales para dar lugar a una estructura mayor (Fig. 4).

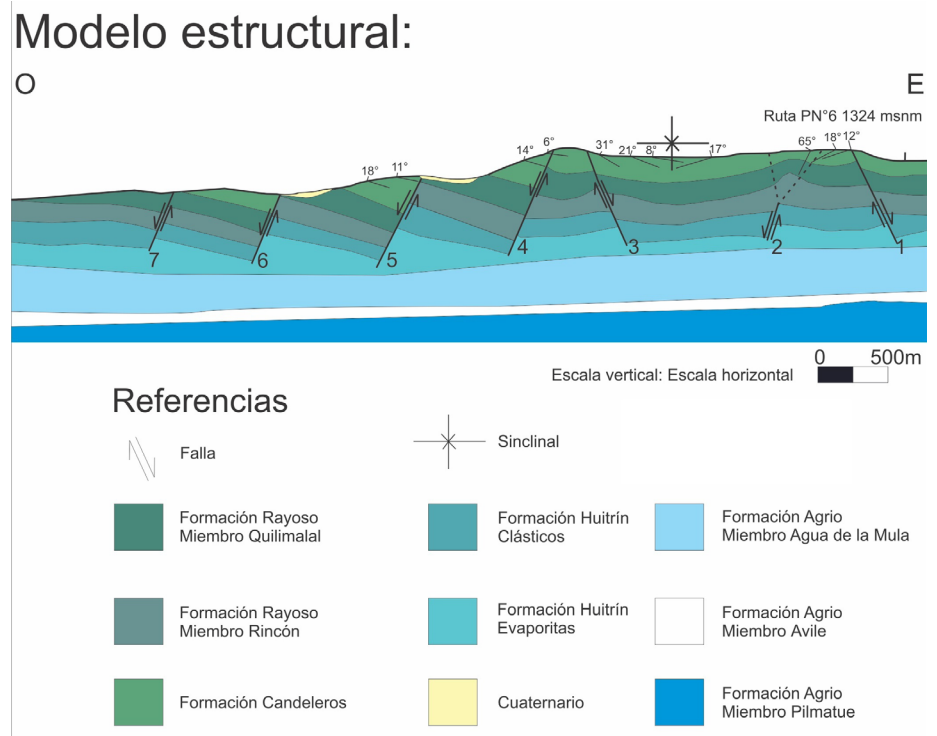


Figura 3. Corte estructural realizado de la zona Las Salinas.



Figura 4. Fotografía de la lomada 4 donde se observan los estratos de las Formaciones Candeleros y Rayoso expuestos y una falla menor que conecta ambos segmentos de la estructura mayor.

MODELADO ANÁLOGO DE FALLAS NORMALES

El objetivo de los modelos realizados es analizar la manera en la que las fallas normales van evolucionando y conectándose a medida que aumenta el grado de extensión. En particular, se pretende visualizar las fallas de relevo que se generan en las zonas de transferencia que conectan diferentes fallas.

El campo de esfuerzos extensional se construye utilizando una plancha de látex de 20 cm sujeta entre dos planchas de acetato. Una de las láminas de acetato va sujeta a un pistón móvil mientras que la otra se mantiene unida a una madera fija. De esta manera, el látex se estira deformando las capas de arena sedimentadas por arriba (Fig. 5). A medida que esto ocurre se toman fotografías del modelo desde la superficie, a un intervalo de una imagen por minuto. Al finalizar fue gelatinizado por 24 horas para lograr una contextura sólida, tras lo cual fue cortado en secciones de 5 mm de ancho aproximadamente. Mientras se realizaban los cortes, se tomaban fotografías con una cámara controlada a control remoto sobre un trípode colocado perpendicular al rumbo de las estructuras. Los 3 modelos realizados presentaron diferentes valores de velocidad y duración.

El modelo 1 fue configurado para una velocidad de 1 centímetro cada 10 minutos. El objetivo era generar un sistema de fallas normales y en esta primera simulación solamente se obtiene una única estructura mayor luego de 25 minutos de extensión. En el modelo 2 se decidió disminuir la velocidad del motor a 1 cm cada 15 minutos. Luego de 60 minutos el mismo fue finalizado. Si bien

se generó un sistema de fallas normales, presentaban poco rechazo.

El modelo 3 presenta también una velocidad del motor de 1 cm cada 15 minutos pero el mismo duró 90 minutos, para permitir un mayor rechazo en las estructuras. Puntualmente, se seleccionó al mismo ya que se considera que es el que mejor ilustra la situación durante el crecimiento de las fallas normales para la creación del cubo 3D. Con las 117 imágenes seriadas obtenidas, una por sección, se construyó mediante el programa Andino 3D un cubo para análisis en 3 dimensiones (Fig. 6).

Cada sección fue interpretada, enfocando el estudio en las fallas subparalelas obtenidas. Se identificaron 3 tipos prin-

cipales: fallas cuyo rechazo se aprecia desde la base a la superficie del modelo, fallas que pierden su rechazo hacia la superficie y una serie de fallas menores que surgen a partir de fallas mayores.

Para explicar el crecimiento de las estructuras existen dos modelos principales, uno de ellos denominado propagación radial (Watterson 1986) y otro por conexión de segmentos (Cartwright *et al.* 1995) (Fig. 7).

En el primer caso, una falla aumenta progresivamente su desplazamiento y largo. El incremento de ambas variables responde a una relación lineal. En el mecanismo por conexión de segmentos, una falla mayor surge a partir de segmentos menores que se propagan radialmente hasta que empiezan a interactuar entre ellos. Cuando esto ocurre, se inhibe el mecanismo de propagación radial, los segmentos se conectan y conforman una estructura mayor. La nueva falla tendrá un alto valor de longitud y poco rechazo. Luego, la estructura evoluciona aumentando su desplazamiento, pero con poco aumento de longitud. De esta forma, la relación entre ambas variables no será lineal.

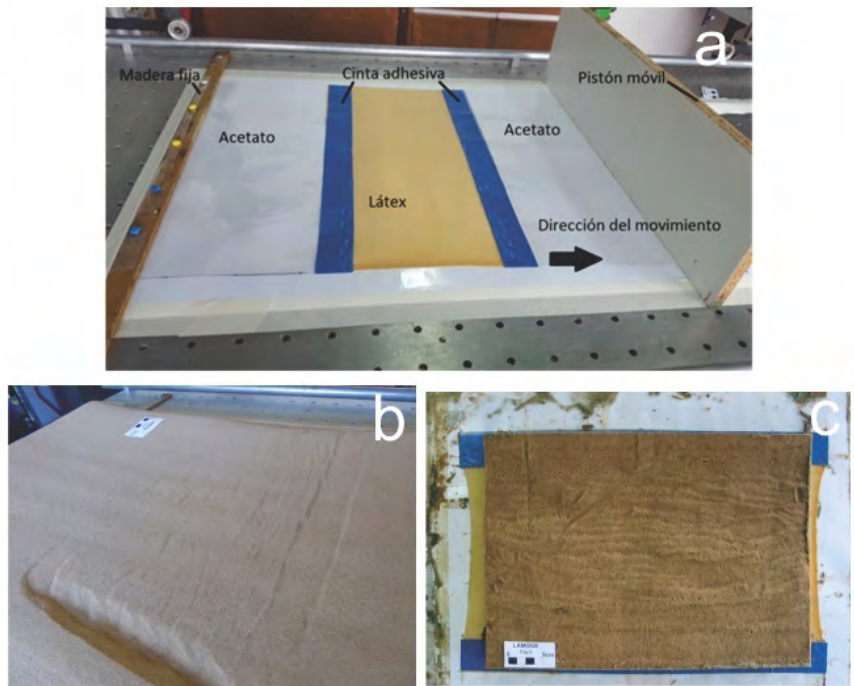


Figura 5. a) Imagen del modelo donde se observa el pistón móvil a la derecha, sujeto a una plancha de acetato. En el centro se coloca la plancha de látex que favorece la extensión. Por arriba se sedimentan capas de arena; b) Imagen del modelo análogo donde las capas de arenas ya se encuentran afectadas por el estiramiento. Se visualizan las fallas cuyo rechazo llega a la superficie; c) Imagen del modelo gelatinizado, previo a realizar los cortes seriados.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Mediante la utilización del programa Andino es posible interpretar la traza de las fallas y calcular superficies desde los bordes externos del modelo hasta el sector central. Se observa que aquellas estructuras que parecen tener continuidad lateral se componen de segmentos individuales unidos por fallas de relevo. De esta manera, quedan conformadas estructuras mayores. Utilizando las imágenes de la superficie del modelo análogo que fueron tomadas durante el desarrollo del experimento, se comprueba que las fallas marcadas como estructuras continuas en el estadio final son en realidad el resultado de la unión de distintos segmentos de fallas menores (Fig. 8).

En base a lo observado mediante las fotografías, se logra concluir que el sistema de fallas crece mediante el mecanismo por conexión de segmentos. Las estructuras finales son el resultado de la propagación de fallas menores que se unen al aumentar el porcentaje de extensión.

El modelado análogo en el laboratorio permite comprender mejor la estructuración de las fallas normales observadas en el campo neuquino. Los resultados muestran que aquellos segmentos interpretados inicialmente como una estructura mayor, resultan a partir de la unión de segmentos de fallas menores (Fig. 9).

En este trabajo, se propone que las fallas podrían estar relacionadas con la tasa de erosión del anticlinal Huitrín. Al remover la cubierta sedimentaria hacia el centro del anticlinal, y teniendo en cuenta la pendiente regional hacia el oeste producto del Dorso de los Chihuidos, sería posible que ocurra el deslizamiento del material dando como resultado estructuras normales. Se interpreta que el espeso manto de evaporitas de la Formación Huitrín actúa como un nivel de despegue de muy baja fricción. En base a observaciones realizadas en la zona, a trabajos previos y a la geología del área, se propone que el nivel de despegue de estas fallas corresponde a las evaporitas de la Formación Huitrín (Lebinson *et al.* 2015). Se sostiene una estructuración en dominó (Fig. 3), implicando estructuras paralelas entre sí, con rotación de los bloques. Este mecanismo suele asociarse a

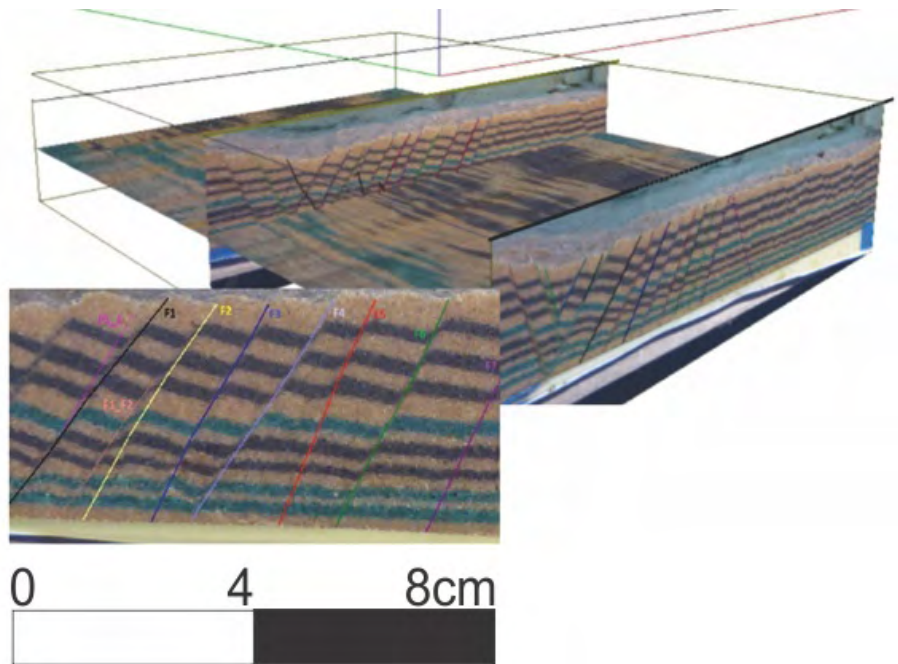


Figura 6. Imagen del cubo 3D obtenido con el programa Andino 3D. Se encuentran interpretadas las secciones 1 y 50. Se observa el detalle de los tres tipos de fallas encontradas: la familia de fallas F, semiparalelas con rechazo desde la base a la superficie del modelo. Estas presentan una configuración en dominó. Además, hay fallas menores, aquellas que surgen en la base, pero pierden rechazo hacia la superficie y aquellas que surgen a partir de las estructuras mayores.

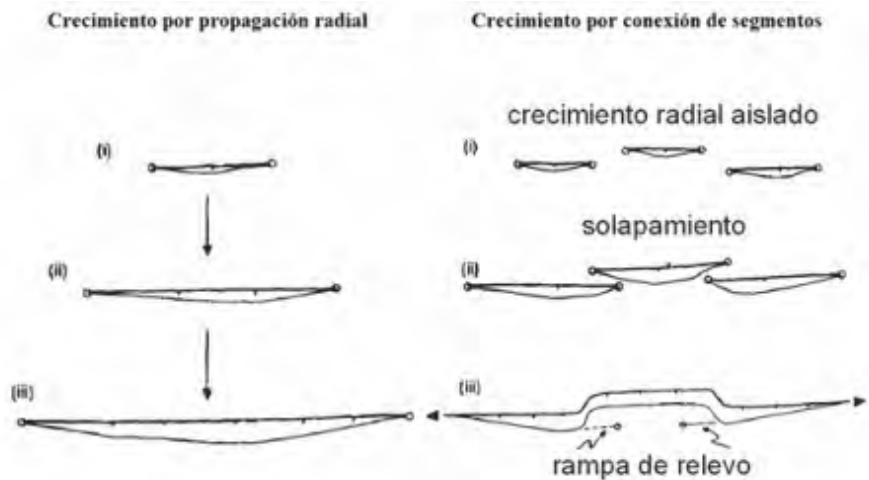


Figura 7. Modelos de crecimiento de estructuras (Modificado de Cartwright *et al.* 1995).

la extensión de material dúctil subyacente (Mandl 1987), en este caso, la Formación Huitrín. Estos niveles salinos migran y rellenan el espacio vacío que queda entre los bloques al realizar rotaciones rígidas, acumulándose en los bloques yacientes de las fallas. En los relevamientos no se encontraron grandes diferencias de inclinación entre los bloques o anticlinales de roll-over que podrían señalar un fallamiento lístrico.

Otros autores proponen que estas fallas podrían desarrollarse en profundidad como fallas lístricas con inclinaciones tanto al oeste como al este (Messenger *et al.* 2014) pero en este relevamiento no se encuentra evidencia para sostener ese modelo de estructuración. En general se observa (ver sector occidental de la sección de la figura 3) que la inclinación de las capas en los bloques colgantes y yacientes de las fallas es similar, hecho característico de las es-

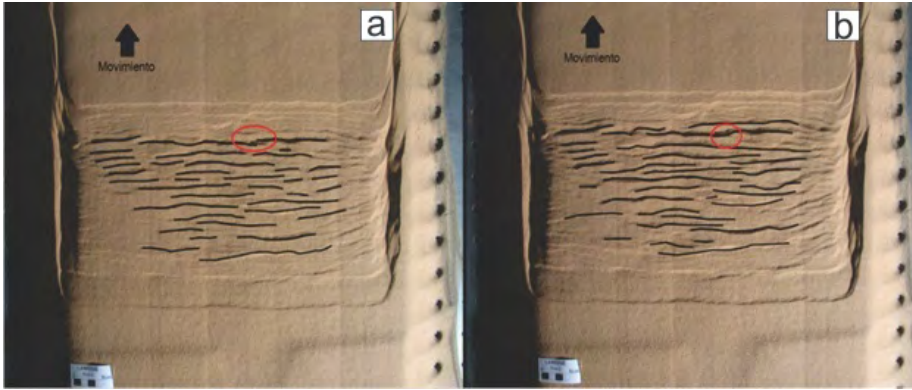


Figura 8. Fotografías de la superficie del modelo donde se aprecian las fallas principales. En rojo se marca la interacción entre dos de estas estructuras, que se solapan para conformar una falla mayor. a) Imagen en estadios intermedios donde se observa como dos estructuras comienzan a interactuar entre sí; b) Imagen tomada hacia el final del modelo. La aparente continuidad de las mismas es en realidad el resultado de la unión de segmentos de fallas menores.

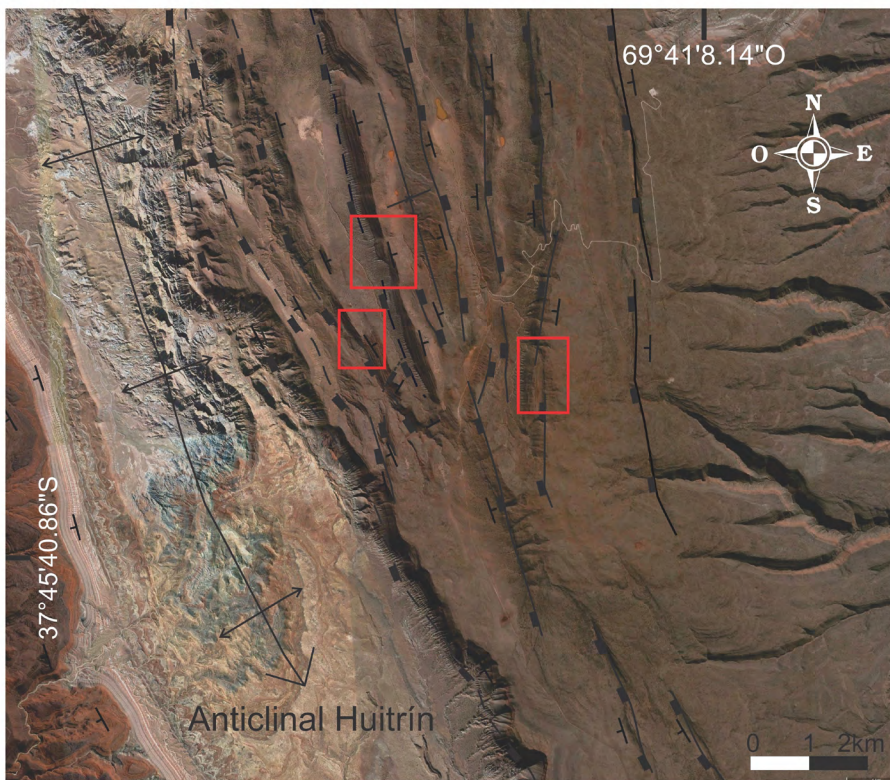


Figura 9. Imagen satelital de la zona de tensión Las Salinas donde se señalan las posibles zonas de transferencia entre las estructuras mayores. Las fallas crecen mediante el mecanismo por conexión de segmentos.

estructuras en dominó. Sin embargo, al no tener imágenes de subsuelo que iluminen estas estructuras, esta caracterización es puramente especulativa.

Por su parte, el mecanismo de deformación tangencial podría haber participado como uno de los componentes para la generación de estas fallas, pero en tal caso se sostiene que su contribución es baja ya que las fallas se ubican en el sector hacia la base del flanco occidental del Dorso. La

zona con mayor deformación tangencial en un anticlinal se encuentra en la charnela, por lo tanto si este mecanismo es el principal generador de las estructuras, las mismas deberían aparecer allí y no en el flanco.

CONCLUSIONES

En este trabajo, se estudiaron las fallas

normales ubicadas al este del anticlinal Huitrín, sobre el flanco occidental del Dorso de los Chihuidos. Los afloramientos mesozoicos se encuentran bien expuestos, siendo posible realizar un estudio de las estructuras principales.

Las fallas de la región presentan una estructuración en dominó, siendo el nivel de despegue de las fallas normales las evaporitas de la Formación Huitrín. En cuanto al origen de las estructuras, el Dorso de los Chihuidos impone una pendiente regional hacia el oeste, por lo tanto, el material salino podría migrar en esa dirección. La erosión del anticlinal Huitrín ubicado al oeste podría haber acelerado la migración dando como resultado un colapso extensional localizado.

La técnica del modelado análogo permite conocer los diferentes estadios de evolución de un sistema de fallas. De esta forma, es posible observar con claridad que aquellas estructuras con una aparente continuidad hacia el final del experimento, resultan de la interacción de estructuras menores que se conectan por medio de fallas de relevo a medida que progresa la extensión. El mecanismo que opera en este proceso es el de conexión de segmentos.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio se realizó con subsidio de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica, PICT 2013-1309. Le agradecemos a los Doctores Laura Giambiagi, Raúl Giacosa y Fernando Daniel Hongn por sus contribuciones con el objetivo de mejorar esta publicación.

REFERENCIAS

- Cartwright, J.A., Trudgill, B.D. y Mansfield, C.S. 1995. Fault growth by segment linkage: an explanation for scatter in maximum displacement and trace length data from the Canyonlands Grabens of SE Utah. *Journal of Structural Geology* 17: 1319-1326.
- Cristallini, E. O., Martínez, J.M., Sanchez, E., Periale Gómez, S. y Loncarich, A. 2005. Evaluación estructural del bloque Bandurria. Provincia del Neuquén, Argentina. YPF - UBA. Informe Inédito, 67 p., Buenos Aires.
- Cobbold, P.R., Diraion, M. y Rosello, E.A.

1999. Bitumen Veins and Eocene Transpression, Neuquén Basin, Argentina. *Tectonophysics* 14: 423-442.
- Corti, C. 2005. Analogue modelling of tectonic processes: theory and applications. www.geociencias.unam.mx/cursos_cegeo/deformacion/sem_1.pdf
- Di Paola, E.C. 1973. Caracterización litoestratigráfica de la Formación Neuquén. 5° Congreso Geológico Argentino, Actas 3: 197-206, Buenos Aires.
- Erslev, E. A. 1991. Trishear fault-propagation folding. *Geology* 19: 617-620.
- Folguera, A., Rojas Vera, E., Spagnuolo, M., García Morabito, E., Zamora Valcarce, G., Bottesi, G., Zapata, T. y Ramos, V.A. 2011. Depósitos Sinorogénicos y Trafogénicos Neógenos a Cuaternarios. Relatorio 18° Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 287-294, Neuquén.
- Garrido, A.C. 2010. Estratigrafía del Grupo Neuquén, Cretácico Superior de la Cuenca Neuquina (República Argentina): Nueva propuesta de ordenamiento litoestratigráfico. *Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales* 12: 121-177.
- Gianni, G., Sagripanti, L., Folguera, A., Spagnuolo, M y Giménez, M. 2014 Tectónica cuaternaria en el retroarco Andino a la latitud del volcán Tromen (37°s). *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 71: 513-525.
- Groeber, P. 1946. Observaciones geológicas a lo largo del meridiano 70°. 1. Hoja Chos Malal. *Revista de la Sociedad Geológica Argentina* 1: 177-208.
- Gulisano, C.A., Gutiérrez Pleimling, A.R. y Di Gregorio, R.E. 1984. Esquema estratigráfico de la secuencia jurásica al oeste de la provincia del Neuquén. 9° Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 236-259, Bariloche.
- Herrero Ducloux, A. 1946. Contribución al conocimiento geológico del Neuquén extraandino. *Boletín de Informaciones Petroleras* 23: 245-281, Buenos Aires.
- Howell, J.A., Schwarz, E., Spalletti, L.A. y Veiga, G.D. 2005. The Neuquén Basin: an overview. *Geological Society, Special Publications* 252: 1-14, London
- Kay, S.M., Burns, M. y Copeland, P. 2006. Upper Cretaceous to Holocene magmatism and evidence for transient Miocene shallowing of the Andean subduction zone under the northern Neuquén Basin. En: Kay, S.M. y Ramos, V.A. (ed.), *Evolution of an Andean Margin: A tectonic and magmatic view from the Andes to the Neuquén Basin (35-39°S)*. Geological Society of America, Special Paper 407: 19-60, Boulder.
- Leanza, H.A. 2003. Las Sedimentitas Huitrinianas y Rayosianas (Cretácico Inferior) en el ámbito central y meridional de la Cuenca Neuquina, Argentina. *Servicio geológico Minero Argentino, Serie Contribuciones Técnicas, Geología* 2: 1-31, Buenos Aires.
- Leanza, H.A. 2009. Las principales discordancias del Mesozoico de la Cuenca Neuquina según observaciones de superficie. *Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales* 11: 145-184.
- Leanza, H.A., Repol, D., Hugo, C.A. y Sruoga, P. 2005. Hoja Geológica 3769-31, Chorríaca, provincia del Neuquén. Programa Nacional de Cartas Geológicas de la República Argentina a escala 1: 100.000. Instituto de Geología y Recursos Minerales. SEGEMAR. *Boletín* 354: 1-93, Buenos Aires.
- Lebrinson, F., Turienzo, M., Sánchez, N., Araujo, V. y Dimieri, L.V. 2015. Geometría y cinemática de las estructuras tectónicas en el externo septentrional de la faja corrida y plegada del Agrio, Cuenca Neuquina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 72: 299-313.
- Legarreta, L. 1985. Análisis estratigráfico de la Formación Huitrín (Cretácico Inferior), provincia de Mendoza. Tesis Doctoral, Universidad de Buenos Aires (Inédita), 247 p., Buenos Aires.
- Mandl, G. 1987. Tectonic deformation by rotating parallel faults: The bookshelf mechanism. *Tectonophysics* 141: 277-316.
- Mareto, H. y Pángaro, F. 2005. Edad de formación de algunas de las grandes estructuras del engolfamiento de la Cuenca Neuquina: Actividad tectónica durante la depositación de la Fm. Quintuco. 6° Congreso de exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Actas digitales, 11 p., Mar del Plata.
- Méndez, V., Zappettini, E. y Zanetti J.C. 1995. Geología y metalogénesis del Orógeno Andino Central, República Argentina. *Secretaría de Minería. Anales* 23: 1-190, Buenos Aires.
- Mescua, J.F., Giambiagi, L.B. y Ramos, V.A. 2013. Late Cretaceous Uplift in the Malargüe fold-and-thrust belt (35°S), southern Central Andes of Argentina and Chile. *Andean Geology* 40: 102-116.
- Message, G., Nivière, B., Martinod, J., Lacan, P. y Xavier J.P. 2010. Geomorphic evidence for Plio-Quaternary compression in the andean foothills of the southern Neuquén Basin, Argentina. *Tectonics* 29: 1-18.
- Message, G., Nivière, B., Lacan, P., Hervouet, Y. y Xavier, J.P. 2014. Plio-Quaternary thin-skinned tectonics along the crustal front flexure of the southern Central Andes: a record of the regional stress regime or of local tectonic-driven gravitational processes? *International Journal of Earth Sciences* 103: 929-51.
- Ramos, V.A. 1981. Descripción Geológica de la Hoja 33c, Los Chihuidos Norte. Provincia del Neuquén. *Servicio Geológico Nacional. Boletín* 182: 1-103, Buenos Aires.
- Ramos V.A. y Folguera, A. 2005. Tectonic evolution of the Andes of Neuquén: Constraints derived from the magmatic arc and foreland deformation. En: Veiga, G.D., Spalletti, L.A., Howell, J.A. y Schwarz, E. (ed.), *The Neuquén Basin: A case study in sequence stratigraphy and basin dynamics*. The Geological Society, Special Publication 252: 15-35, London.
- Sánchez, M.L. y Asurmendi, E. 2015. Estratigrafía y sedimentología del abanico terminal de la Formación Candeleros (Grupo Neuquén), Cretácico Inferior, Cuenca Neuquina, provincias de Neuquén y Mendoza, Argentina. *Andean Geology* 42: 329-348.
- Schellart, W.P y Strak, V. 2016. A review of analogue modelling of geodynamic processes: Approaches, scaling, materials and quantification, with an application to subduction experiments. *Journal of Geodynamics* 100: 7-32.
- Sigismondi, M.E. 2012. Estudio de la deformación litosférica de la cuenca Neuquina: estructura termal, datos de gravedad y sísmica de reflexión. Tesis Doctoral. Universidad de Buenos Aires (Inédita), 381 p., Buenos Aires.
- Somoza, R., Tomlinson, A. y Prezzi, C. 2002. Los Andes Centrales en el Cenozoico Tardío: aumento en la tasa de acortamiento y disminución en la velocidad de convergencia. 15° Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 181-186, El Calafate.
- Stipanovic, P.N., Rodrigo, F., Baulies, O.L. y Martínez, C.G. 1968. Las formaciones pre-noronianas en el denominado Macizo Nordpatagónico y regiones adyacentes. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 23: 37-53.
- Uliana, M. A., Dellape, D.A. y Pando, G.A. 1975a. Distribución y génesis de las sedimentitas rayosianas. (Cretácico inferior de las provincias de Neuquén y Mendoza). 2° Congreso Iberoamericano de Geología Económica, Actas 1: 151-176, Buenos Aires.

- Uliana, M. A., Dellape, D.A y Pando, G.A. 1975b. Estratigrafía de las sedimentitas raiosianas. (Cretácico inferior de las provincias de Neuquén y Mendoza). 2° Congreso Iberoamericano de Geología Económica, Actas 1: 177-196, Buenos Aires.
- Vidal, R.O., Oriol, F., Koyi, H. y Roca, E. 2008. 3D reconstruction of analogue modelling experiments from 2D datasets. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata* 49: 524-528.
- Watterson, J., 1986. Fault dimensions, displacements and growth. *Pure and Applied Geophysics* 124: 363-365.
- Zamora Valcarce, G., Rapalini, A.E. y Spagnuolo, C.M. 2007. Reactivación de estructuras cretácicas durante la deformación miocena, Faja plegada del Agrio, Neuquén. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 62: 299-307.
- Zamora Valcarce, G., Zapata, T., Ramos, V.A., Rodríguez, F. y Bernardo, L.M. 2009. Evolución Tectónica del Frente Andino en Neuquén. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 65: 192-203.
- Zapata, T.R., Córscico, S., Dzelalija, F. y Zamora, G. 2002. La faja plegada y corrida del Agrio: análisis estructural y su relación con los estratos terciarios de la cuenca neuquina, Argentina. 5° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Actas en CD, Mar del Plata.

Recibido: 19 de abril, 2018.

Aceptado: 21 de noviembre, 2018.