

SISTEMA COMPRESIVO SOBREIMPUESTO A UN RIFT OBLICUO: APLICACIONES EN LA FAJA PLEGADA Y CORRIDA DE MALARGÜE, SUR DE MENDOZA

Daniel L. YAGUPSKY¹, Ernesto O. CRISTALLINI¹, Gonzalo ZAMORA VALCARCE² y Roberto VARADÉ²

¹Laboratorio de Modelado Geológico (LaMoGe), Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Pabellón II - Ciudad Universitaria, C1428EHA, Ciudad Autónoma de Buenos Aires.

CONICET. E-mail: daniel@gl.fcen.uba.ar

²Repsol YPF, Esmeralda 255, piso 10, Of. 10001E, Buenos Aires.

RESUMEN

Se llevaron a cabo modelos análogos para simular la evolución resultante de la aplicación de esfuerzos compresivos oblicuos al eje de un sistema extensional preexistente. Se utilizaron materiales granulares para representar rocas frágiles de la corteza superior. En la base de los modelos se indujo la formación de dos hemigrábenes asimétricos y de una falla de transferencia entre ambos, para luego comprimir el sistema desplazando un pistón en sentido oblicuo al rumbo de los hemigrábenes. El objetivo de estos experimentos fue analizar el arreglo estructural resultante a partir de un cambio de régimen tectónico, estudiando la influencia que ejercen las estructuras extensionales preexistentes sobre el estilo de la deformación compresiva sobreimpuesta. Aunque los resultados obtenidos muestran que la reactivación de las fallas normales es mínima, su presencia ejerce un fuerte control geométrico en el arreglo final de las fallas inversas. Al aumentar la distancia entre el sistema extensional subyacente y el frente de empuje, el control sobre los corrimientos generados se pierde. Asociados al control estructural impuesto se encontraron cambios de rumbo de los corrimientos, variaciones en las dimensiones de las láminas de corrimiento, levantamientos diferenciales en sectores próximos a la estructura subyacente y formación de corrimientos fuera de secuencia en sectores determinados del sistema. Estos resultados fueron comparados con la arquitectura estructural del sector sur de la faja plegada y corrida de Malargüe, sugiriendo analogías que permiten interpretar la presencia de trenes de extensión de orientación NE y NO durante el evento extensivo jurásico en esta región.

Palabras clave: *Modelos análogo, rift oblicuo, control estructural, inversión, faja plegada y corrida de Malargüe.*

ABSTRACT: *A compressive system overimposed to an oblique rift: Applications in the Malargüe fold and thrust belt, southern Mendoza.* Analogue modelling experiments were performed to simulate the evolution that results from the application of compressive stresses oblique to the axis of a pre-existing extensional system. Granular materials were used to represent brittle upper crustal rocks. Two asymmetric halfgrabens linked by a transfer fault were created in the base of the models, and were subsequently compressed moving a piston in oblique sense to the halfgrabens' strike. The aim of these experiments was to analyze the structural pattern that results from a change of tectonic regime, studying the influence that exerts the preexisting extensional structures over the style of latter compressive deformation. Even though the obtained results show limited reactivation of normal faults, the final geometric arrangement of the new reverse faults was strongly controlled by them. Increasing the distance between the underlying extensional system and the advancing thrust front results in a loss of its influence over the newly formed thrusts. Associated with the imposed structural control, strike changes of the thrusts, length variations of the thrust sheets, differential uplifting near the basal structure and out of sequence thrusting localized in certain sectors of the system were found. These results have been compared with the structural architecture of the southern sector of the Malargüe fold and thrust belt, suggesting analogies that allow interpreting the presence of NE and NW oriented extensional trends for the Jurassic extensional event in this region.

Keywords: *Analogue modelling, oblique rift, structural control, inversion, Malargüe fold and thrust belt.*

INTRODUCCIÓN

La geometría y la cinemática de la deformación en sistemas de inversión tectónica son significativamente diferentes a las halladas en cuñas de corrimientos donde no se registran controles extensionales previos; algunos ejemplos de modelos análogos de cuñas de corrimientos sin controles preexis-

tentes pueden consultarse en los trabajos de Dahlen *et al.* (1984), Davis *et al.* (1984), Huiqi *et al.* (1992), entre otros. No obstante, cuando existen controles estructurales de basamento, es posible que en ciertas zonas del sistema los corrimientos sobreimpuestos adopten rumbos independientes de la dirección del eje del sistema extensional preexistente. Los modelos análogos de in-

versión se llevan a cabo utilizando distintas técnicas, obteniéndose así resultados diversos: algunos autores plantearon experiencias donde se analiza la deformación sufrida por el bloque colgante de un hemigraben, siendo el bloque yacente rígido (madera, aluminio, etc.) (Buchanan y McClay 1991, McClay y Buchanan 1992). Este esquema permite diseñar una falla directa

principal de geometrías variables (lítricas, rampa-plano, etc.), con la formación de fallas normales sobre el bloque colgante conformado por arenas o arcillas, y estudiar luego la formación de nuevas fallas o la reactivación de las ya existentes durante la inversión del sistema. Otras variantes son la inversión de un único bloque rígido de "basamento" cubierto por materiales granulares (Koopman *et al.* 1987) o de una serie de bloques rígidos combinados, simulando fallas en dominó que los basculan, regresándolos luego a su posición original (Buchanan y McClay 1991, McKlay y Buchanan 1992). En todos los casos descriptos se utilizan bloques de "basamento" rígidos que no son susceptibles a sufrir de-formación; otros autores (Sassi *et al.* 1993, Mitra e Islam 1994, Eisenstadt y Withjock 1995, Brun y Nalpas 1996, Dubois *et al.* 2002, Amilibia *et al.* 2005, Panien *et al.* 2005) realizaron experimentos análogos de inversión tectónica en los que ambos bloques involucrados pueden deformarse. Dentro del grupo de trabajos mencionado interesa particularmente para el presente análisis el de Brun y Nalpas (1996), en el cual se estudian los efectos de la oblicuidad entre la dirección de acortamiento y el eje del hemigraben invertido, y fundamentalmente el trabajo de Panien *et al.* (2005) en el que se analiza la influencia de la orientación de un graben, y del tipo y espesor de su relleno, sobre las características de la inversión posterior. Estos experimentos sugieren que los hemigrabenes preexistentes y su orientación respecto a los esfuerzos compresivos aplicados ejercen un control de primer orden sobre la dirección y la localización de las estructuras compresivas resultantes, sin observarse la formación de estructuras con direcciones independientes a las impuestas en el basamento de los modelos.

Los experimentos aquí presentados consisten en la deformación de materiales granulares de diferentes características mecánicas, análogas a las rocas de la corteza superior, dispuestos sobre una mesa de modelado sin bordes laterales. El dispositivo experimental utilizado permite la formación de dos hemigrabenes, y luego de rellenar el espacio generado, comprimir el sistema por medio de un pistón que se desplaza oblicuamente a las estructuras previas.

El objetivo de estos experimentos es analizar los arreglos estructurales resultantes a partir de un cambio de régimen tectónico, en el cual durante una etapa extensional inicial se configuran dos hemigrabenes conectados por una zona de transferencia, y en una etapa posterior se imponen esfuerzos compresivos oblicuos al eje de las estructuras previamente desarrolladas. Teniendo un conocimiento acabado de la geometría de las estructuras extensionales presentes en el basamento y de la dirección de la compresión aplicada, se analiza la influencia que ejercen las primeras sobre el arreglo estructural generado durante la contracción. Se enfatiza en la descripción de las estructuras compresivas, destacándose que en zonas específicas del modelo éstas presentan en planta rumbos cambiantes, a veces no coincidentes con los ejes de los hemigrabenes subyacentes, pero que sin embargo están influidos por su presencia. Se propone una explicación teórica en cuanto a la formación y localización de corrimientos fuera de secuencia en sectores particulares del modelo como respuesta al esquema planteado. Los resultados obtenidos a partir de los modelos son comparados con prototipos de campo ubicados en el sur de la provincia de Mendoza, en la faja plegada y corrida de Malargüe (Kozłowski *et al.* 1993), sobre el extremo sur de la Cordillera Principal (Yrigoyen 1972). Se evalúa la posibilidad de que ciertos lineamientos NE y NO observados respondan a fallas normales triásico-jurásicas que limitan hemigrabenes, y a zonas de transferencia entre ellas. Según esta hipótesis los hemigrabenes serían oblicuos a los esfuerzos compresivos terciarios y no perpendiculares a ellos como se asume tradicionalmente para esta región. Se proponen posibles mecanismos de control de las estructuras del rift sobre las estructuras andinas.

MÉTODOS UTILIZADOS

Se llevan a cabo simulaciones a escala de laboratorio contrastándolas con datos tanto de campo como de subsuelo de la región estudiada, identificando y revisando los rasgos estructurales y geológicos ya cartografiados por otros autores. El modelo presentado es repetido utilizando iguales paráme-

tros experimentales para asegurar la reproducibilidad de los resultados obtenidos.

Procedimiento experimental de modelado

Los materiales utilizados son arena seca y microesferas de vidrio; los granos de arena son redondeados, bien seleccionados y su tamaño, al igual que el de las microesferas de vidrio, es menor a 600 micrones. Una primera aproximación permite inferir que estos materiales se comportan de acuerdo con lo previsto por la envolvente de ruptura lineal de Mohr (Krantz 1991). Sus propiedades mecánicas son determinadas por medio de un aparato de Hubbert (Hubbert 1951), el cual permite obtener la relación entre el esfuerzo normal y el de cizalla al producirse la ruptura. Realizando una regresión lineal de los valores obtenidos es posible obtener el coeficiente de fricción interna (μ) y por lo tanto calcular el ángulo de fricción interna (Φ) de cada material (Cuadro 1). El ángulo de fricción interna obtenido para la arena utilizada oscila entre 30° y 35°, valores similares a los determinados experimentalmente para rocas competentes de la corteza superior (Byerlee 1978), mientras que el de las microesferas se encuentra entre 25° y 30°, simulando efectivamente rocas de menor competencia. El coeficiente de fricción basal entre arena y acetato (μ_b) obtenido es bajo, acorde con un despegue efectivo en la corteza superior. Cuando el material sometido a compresión alcanza la condición de ruptura se forman zonas de cizalla dilatacionales (fallas), con ángulos agudos respecto a la dirección principal de esfuerzos, como predice la teoría de Coulomb. En función de estas propiedades, los materiales utilizados resultan una buena analogía para simular deformación frágil en la corteza superior (Hubbert 1937, 1951, Sandford 1959), asumiéndose un comportamiento reológico independiente del factor tiempo.

Los modelos a escala deben presentar similitud geométrica, cinemática y dinámica con respecto a los casos naturales que intentan representar (Hubbert 1937, Ramberg 1981). En el presente trabajo un centímetro en los modelos representa aproximadamente un kilómetro de la región estudiada (factor de escala geométrica $\lambda = 10^3$), la relación de densidades (ρ) entre los materiales granulares usados y las rocas es $\rho \approx$

CUADRO 1: Propiedades físicas de los materiales utilizados obtenidas por medio de un aparato de Hubbert.

	Arena seca (600µm)	Microesferas de vidrio (600µm)
Coefficiente de fricción interna (µ)	0,64 ± 0,06	0,54 ± 0,05
Ángulo de fricción interna (Φ)	32,7°	28,3°
Fricción basal arena/acetato(µb)	0,16 ± 0,02	

0,5, mientras que la aceleración de la gravedad sobre la superficie de la Tierra impone una relación de escala $g = 1$. A partir de estos valores, la relación de esfuerzos (σ) correspondiente entre modelo y caso natural es

$$\sigma = \rho \cdot g \cdot \rho \approx 5 \times 10^6$$

Asumiendo para las rocas de la corteza superior un comportamiento coulombiano y un valor de cohesión $C \approx 10^7$ Pa, la arena y las microesferas de vidrio, cuya cohesión es de decenas de Pascuales, son materiales adecuados para trabajar a la escala seleccionada.

Se depositó inicialmente un espesor de 2 cm de arena seca, conformado por una alternancia de bancos claros y oscuros de este material de aproximadamente 3 mm cada uno, sobre dos planchas superpuestas de acetato, cubriendo un área de 48 cm x 67 cm. Separando estas planchas se generó una etapa inicial de extensión afectando al *pre-rift* del modelo, representado por el paquete de arena suprayacente. De esta forma se indujo la formación de dos hemigrábenes de dirección N50°O y una zona de transferencia perpendicular a este rumbo (se seleccionó un sistema de referencia donde los esfuerzos compresivos provienen del oeste, Fig. 1). El desplazamiento extensional aplicado fue de dos centímetros.

Los depósitos de *synrift* fueron simulados utilizando microesferas de vidrio como relleno de los hemigrábenes generados durante la extensión. Se alcanzaron espesores de hasta un centímetro, y se cubrió todo el modelo con una delgada lámina de este material, cuyo coeficiente de fricción interna es menor al de la arena (Cuadro 1). El espesor final de 3 cm se alcanzó utilizando arena nuevamente, alternando niveles claros y oscuros, simulando así los depósitos correspondientes al *post-rift* (Figs. 2 y 3).

La deformación compresiva del modelo se llevó a cabo desplazando un pistón en dirección E-O, oblicua al rumbo de los hemigrábenes subyacentes (Fig. 1). Su desplazamiento se logró mediante un tornillo sin fin accionado por un motor eléctrico paso a paso controlado por computadora y un reductor mecánico, permitiendo así movimientos precisos. En todos los experimentos la pared móvil avanzó a una velocidad estable de 6 cm/h, alcanzando un acortamiento total de 9,5 cm. Se tomaron fotografías en planta cada un minuto para registrar la deformación etapa por etapa. Una vez finalizado el experimento, se realizaron 128 cortes perpendiculares al pistón que fueron escaneados e integrados en un

volumen de datos con el objeto de visualizar su estructura interna. A partir de esta información, y junto con fotografías de la superficie del modelo tomadas cada 1 minuto, se logró una cobertura tridimensional del mismo. La visualización se logró a partir de dos programas: el GENERADOR.EXE y el VISOR3D_2.EXE (Cristallini 2006). El primero de estos programas interpola la información entre los cortes disponibles, y el segundo permite visualizar secciones a elección en tres direcciones, cortes arbitrarios y bloques tridimensionales del modelo. A partir de estos datos se realizó la interpretación del arreglo estructural resultante.

RESULTADOS

Se describen a continuación los resultados experimentales obtenidos, presentando en

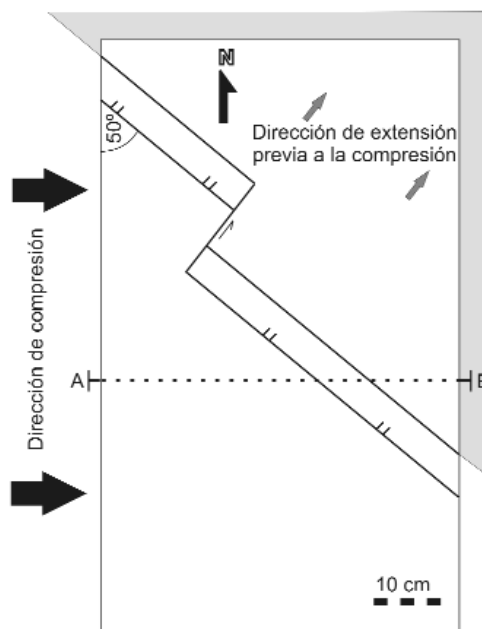


Figura 1: Arreglo experimental. Vista en planta de la geometría de los grábenes luego de 2 cm de extensión oblicua con respecto a la dirección de compresión posterior.

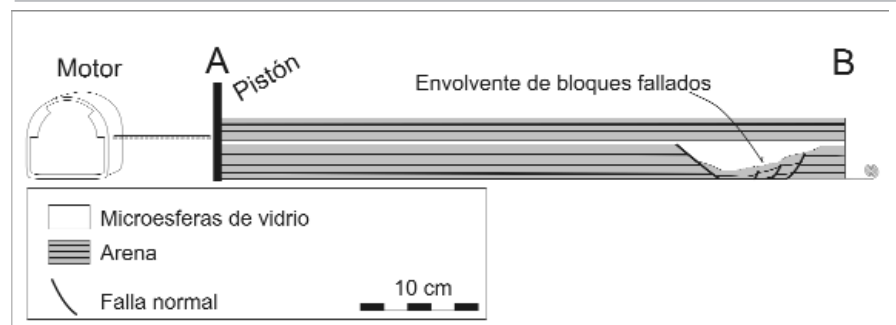


Figura 2: Corte previo a la compresión. Ubicación en la figura 1.

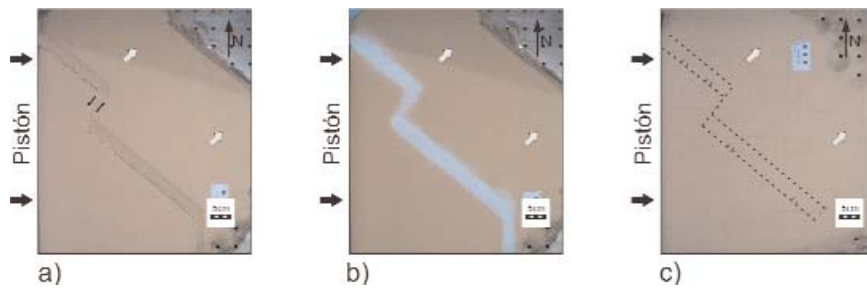


Figura 3: Fotografías tomadas durante la preparación del modelo. Las flechas grises indican la dirección de extensión y las negras indican la dirección de compresión posterior. a) Formación de los hemigrábenes (etapa extensional). b) Relleno de los hemigrábenes con microesferas de vidrio, simulando los depósitos de *syn-rift*. c) Aspecto final del modelo antes de ser comprimido, con la capa de arena que simula el *post-rift*. Se señala en líneas punteadas la posición del sistema extensional subyacente.

primer término la configuración de las estructuras extensionales desarrolladas y posteriormente la evolución y arreglo estructural de la etapa compresiva, teniendo en cuenta que los esfuerzos que la generan son oblicuos al sistema tensional anterior.

ETAPA EXTENSIONAL

Durante la etapa extensional del experimento, una de las láminas de acetato basal fue separada 2cm de la otra, que permaneció fija, separando en dos grandes bloques al material suprayacente. Entre estos dos bloques se formaron fallas normales conjugadas, siendo la falla maestra coincidente con el borde de la lámina fija y su inclinación de 40° hacia el NE del modelo (Figs. 1 y 2). Las fallas conjugadas generadas en el bloque colgante limitan tres bloques menores, dando una configuración asimétrica a los hemigrábenes. Este esquema se mantiene a lo largo del rumbo de los hemigrábenes mostrando variaciones menores que no modifican su asimetría. El eje del sistema extensional y las fallas principales y menores que lo componen presentan un rumbo perpendicular a la dirección de extensión aplicada, formando un ángulo de 50° con el pistón que activará en la siguiente etapa los esfuerzos compresivos (Fig. 1). Entre las fosas generadas se desarrolla una zona de transferencia perpendicular al rumbo de las mismas. Su configuración fue determinada por el arreglo experimental utilizado y consiste en una única falla de rumbo con desplazamiento senestral y traza recta (Fig. 3a). A ambos lados de la zona de acomodación, la

vergencia y configuración de las fallas son análogas.

ETAPA COMPRESIVA

En la figura 4 se observan ocho fotografías tomadas en planta, cada una de las cuales registra un estadio durante la evolución del modelo planteado. Se indica la posición inferida de las estructuras subyacentes, las cuales fueron reacomodadas según el acortamiento sufrido en cada etapa. Este procedimiento se realizó suponiendo una deformación continua del bloque, lo cual no es exacto, pero permite conocer de manera aproximada la ubicación de los hemigrábenes "a" y "b" y de la zona de transferencia en el momento registrado por cada fotografía. Asimismo, se indican sobre cada una de ellas los corrimientos y los retrocorrimientos formados. El estado de deformación final del experimento puede verse en la figura 4h. Se identificaron con números las fallas inversas mapeadas, respetándose esta nominación para las fallas correspondientes en los cortes transversales del modelo (Fig. 5). También se numeró a las fallas en función de su orden de ocurrencia y persistencia durante la deformación (Fig. 6).

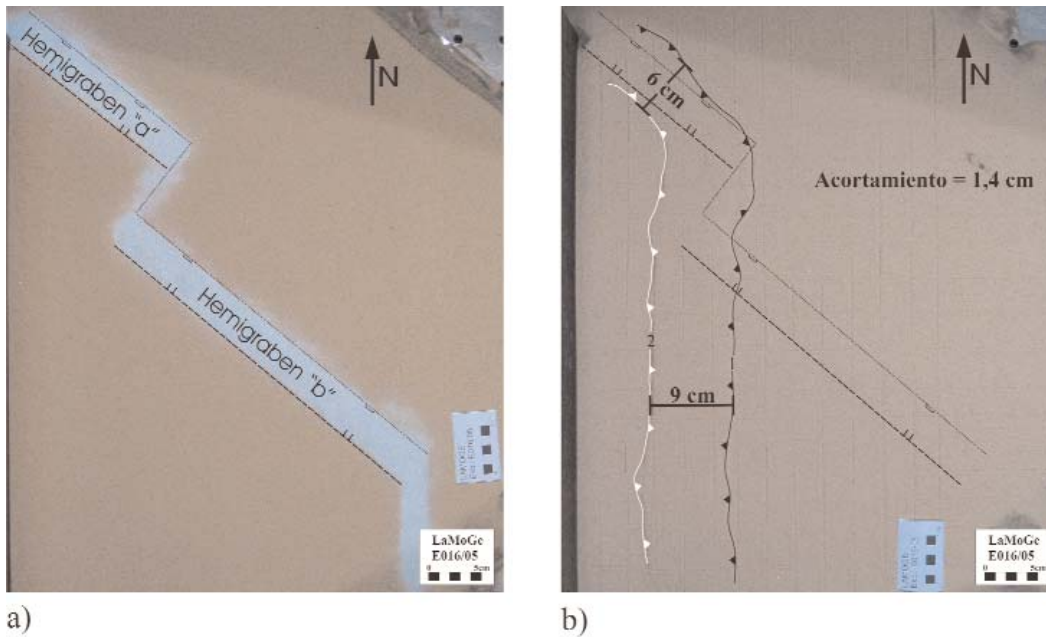
Luego de los primeros 1,4 cm de acortamiento (Fig. 4b) se forman simultáneamente un corrimiento (1) y un retrocorrimiento (2) conjugados, generando una estructura tipo pop-up. La traza del corrimiento acompaña la dirección del hemigráben "a" subyacente, se curva al alcanzar la zona de transferencia, y desde allí hacia el sur del modelo adopta un rumbo N-S perpendicular a la

dirección de compresión. Se identifica sobre esta estructura una leve inflexión al atravesar el hemigráben "b". Analizando los cortes del estado final del modelo (Fig. 5), se observa en la sección A que el corrimiento 1 descrito aprovecha para su desarrollo la envolvente de los bloques menores fallados del bloque colgante del hemigráben (esta superficie fue destacada en el corte de la figura 2). Al alcanzar el acortamiento final, el relleno es extruído y la falla alcanza la superficie del modelo, generando un pliegue de limbo frontal volcado. Este corrimiento es a su vez responsable del desplazamiento pasivo del bloque yacente del hemigráben sobre el bloque colgante del mismo. La falla maestra del hemigráben registra una muy leve reactivación.

El retrocorrimiento 2 (Fig. 4b) presenta una traza subparalela al corrimiento 1 conjugado, y desarrolla un suave pandeo a la altura de la zona de transferencia generada entre los hemigrábenes "a" y "b" subyacentes. Al norte de esta zona de transferencia su rumbo es oblicuo a la compresión, adaptándose a la dirección del hemigráben "a" (rumbo N50°O). La distancia entre el corrimiento 1 y el retrocorrimiento 2 descritos no es constante a lo largo del rumbo de estas estructuras; su separación es de 9 cm en promedio a lo largo del sector con rumbo norte, disminuyendo a 6 cm en su tramo oblicuo, controlado por la geometría del hemigráben "a" subyacente.

Al alcanzar 2,2 cm de acortamiento (Fig. 4c) se desarrollan los retrocorrimientos 3 y 4, en secuencia con respecto al anterior (retrocorrimiento 2). El rumbo del retrocorrimiento 3 es aproximadamente N 50° O y se extiende abarcando parte de la longitud del hemigráben "a", cuya posición inferida se muestra en la figura. El retrocorrimiento 4 es predominantemente N-S, y se desarrolla desde el extremo sur del modelo hasta la zona de transferencia, donde muestra una inflexión subparalela a la que presenta el retrocorrimiento 2 en ese sector, uniéndose más al norte con el retrocorrimiento 3. Durante la evolución de estas estructuras el frente de deformación, representado por el corrimiento 1, permanece activo.

En la siguiente etapa, luego de 4,2 cm de acortamiento, se producen las estructuras 5, 6 y 7 de la figura 4d. El corrimiento 5 corta



Referencias

Corrimiento

Retrocorrimiento

Falla maestra del hemigraben subyacente

Límite del relleno del hemigraben subyacente

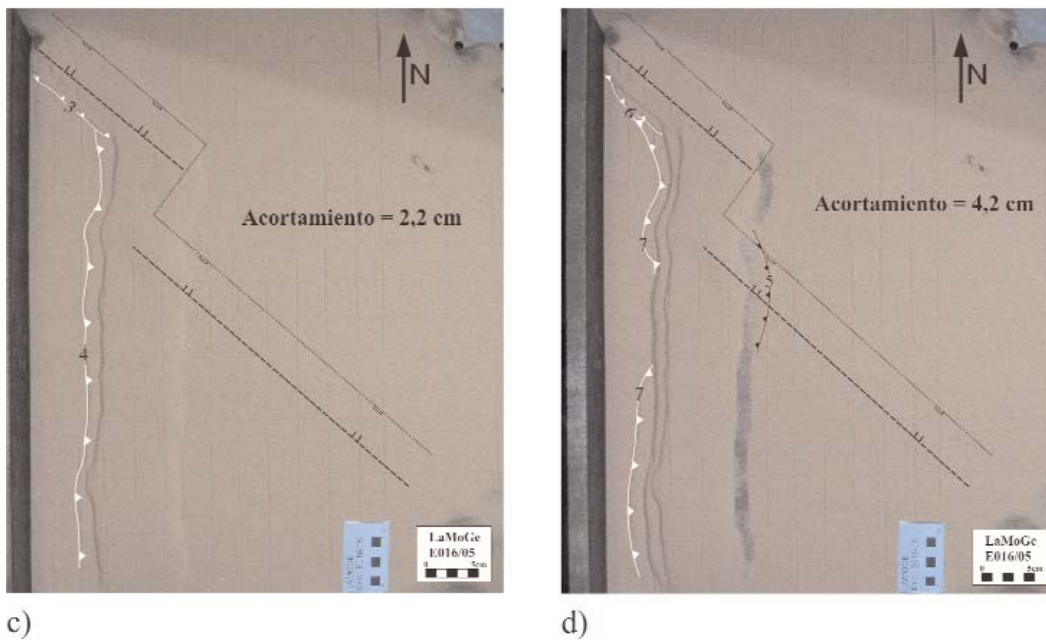


Figura 4: Fotografías de la superficie del modelo planteado en distintos estadios de su evolución (ver descripción detallada en el texto). a) Esquema estructural del modelo luego de 2cm de extensión. b), c) y d) estadios durante la deformación compresiva; se indica la posición inferida de los hemigrábenes subyacentes y se marcan los corrimientos en negro y los retrocorrimientos en blanco, numerados para su identificación.

un sector del hemigraben "b" subyacente, afectando parte de su relleno. En la sección C de la figura 5 puede observarse como esta estructura corta y desplaza la falla maestra limitante del hemigraben. Hacia el norte se fusiona con el antiguo frente de deformación conformado por el corrimiento 1, modificando levemente su geometría pero

manteniendo su actividad (Fig. 4d). Los retrocorrimientos 6 y 7 se generan en secuencia con los descritos para las etapas de deformación previas, y su arreglo geométrico es similar. No obstante, el retrocorrimiento 7 interrumpe su desarrollo uniéndose con el retrocorrimiento 4 de la etapa anterior en un tramo que coincide hacia el

este del modelo con la extensión abarcada por el corrimiento 5 (Fig. 4d). Al alcanzar 6 cm de acortamiento se observa la formación del corrimiento 8 (Fig. 4e). Esta falla se desarrolla de norte a sur, conectándose en su extremo norte con el corrimiento 5 descrito en la etapa anterior, y corta a través del relleno del hemigraben

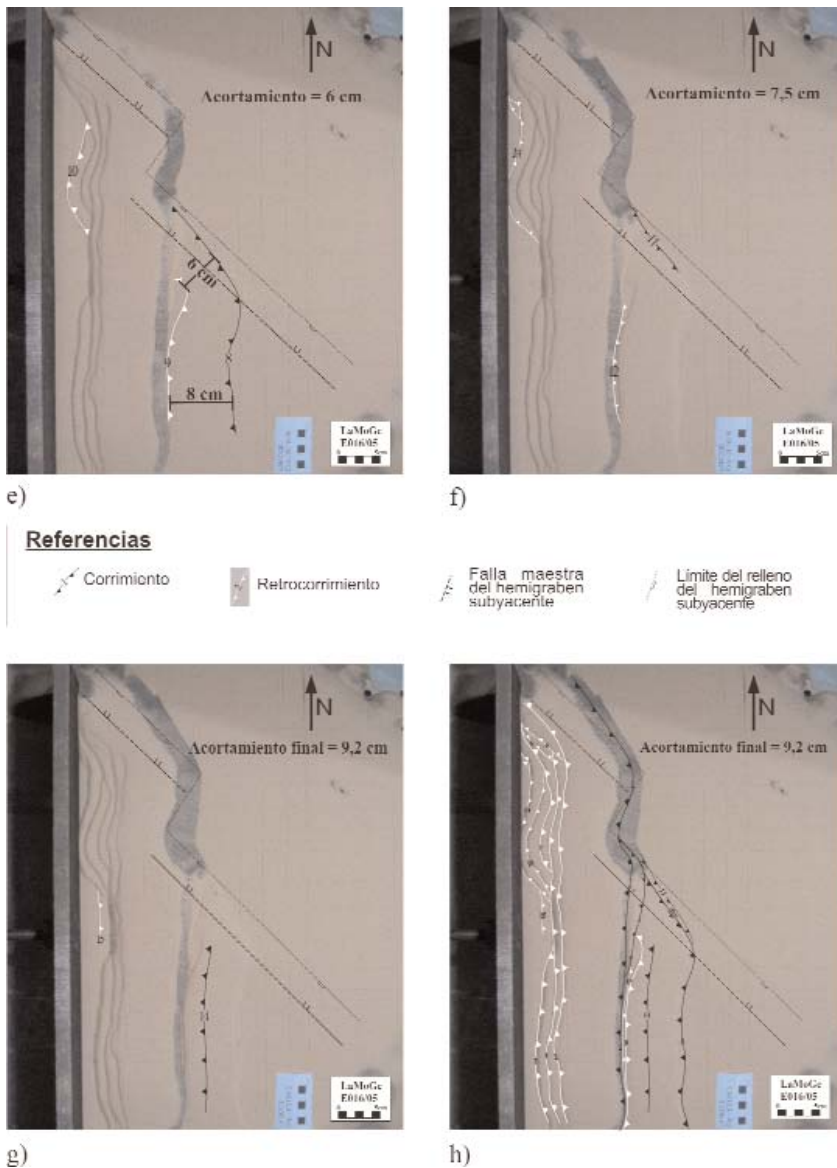


Figura 4: e), f) y g) Estadios de la deformación compresiva; se indica la posición inferida de los hemigrábenes subyacentes y se marcan las estructuras formadas en cada etapa, numeradas para su identificación. h) Foto y mapeo estructural del estado final del modelo. En negro se indican los corrimientos y en blanco los retrocorrimientos.

"b" subyacente con un rumbo N40°O; se recuerda que el hemigraben tiene una actitud N 50° O (sección C de la figura 5 y Fig. 4e). La falla cambia de rumbo al abandonar el control del graben "b" subyacente, retrocediendo levemente hacia el oeste y disponiéndose desde allí hacia el sur paralelamente

al pistón, es decir N-S. Este cambio de rumbo de la estructura considerada se registra a una distancia de 9,8 cm del frente de deformación previo representado por el corrimiento 1. De este modo, el nuevo frente de corrimientos puede seguirse a lo largo del límite oriental del hemigraben "a", de la

zona de transferencia, y del corrimiento 8 de esta etapa, observándose una disociación de este último con respecto al hemigraben "b" aproximadamente al alcanzar la mitad de su desarrollo longitudinal. Como resultado el frente de deformación registra un mayor desarrollo hacia el sur del modelo,

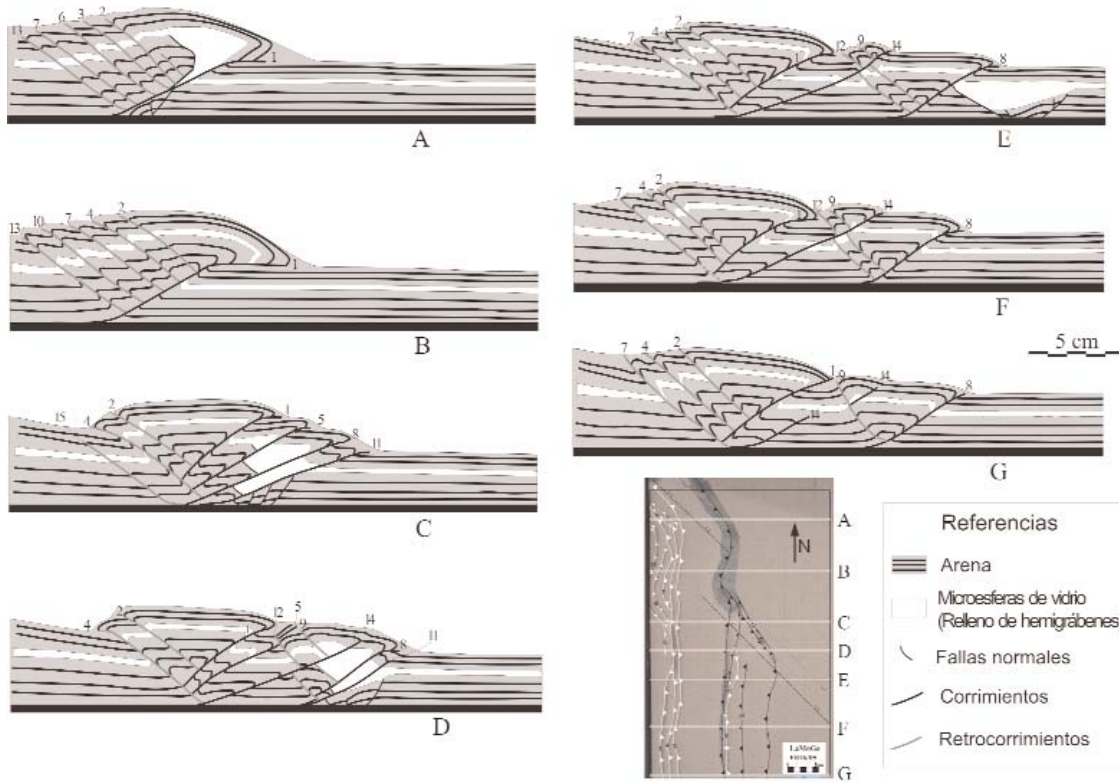


Figura 5: Interpretación de los cortes paralelos a la dirección de compresión (E-O) realizados sobre el modelo una vez deformado. La numeración empleada para las estructuras se corresponde con la de la figura 4.

donde existe una mayor distancia entre la estructura extensional oblicua preexistente y el pistón.

Los retrocorrimientos 9 y 10 (Fig. 4e) se forman al mismo tiempo que el corrimiento 8. El primero de ellos alcanza la superficie del modelo aproximadamente sobre la escarpa del corrimiento 1, formado en la primera etapa de deformación (Fig. 4b). Su geometría en planta muestra una inflexión subparalela a la descrita para el corrimiento 8, pasando de un rumbo N-S en su tramo más austral, a adoptar un rumbo aproximado N 40° O, subparalelo al eje del hemigraben "b" subyacente hacia su extremo norte. En la sección D de la figura 5 se observa que el cambio de rumbo del retrocorrimiento 9 se produce debido a que dicha estructura reactiva en este sector a la falla maestra del hemigraben. Como fue observado para las estructuras de la figura 4b, las fallas 8 y 9 de la figura 4e conforman un corrimiento y un retrocorrimiento conjugados (secciones D, E, F y G de la figura 5). Su distancia relativa en la superficie del modelo varía de acuerdo con sus modificaciones en el rumbo: sus tramos N-S están distanciados en promedio unos 8 cm, mien-

tras que al adoptar una dirección oblicua ~N40°O su separación media baja a 6 cm. El retrocorrimiento 10 se forma en secuencia con los desarrollados en las etapas anteriores de deformación. Cubre una franja del modelo abarcada por la zona de transferencia entre los dos hemigrabenes, y desarrolla una geometría arqueada respetando la concavidad de esta última.

Luego de 7,5 cm de acortamiento aplicado se forman las estructuras de la figura 4f. El corrimiento 11 aprovecha para generarse la superficie envolvente de los bloques menores fallados del bloque colgante del hemigraben "b" (sección C de la figura 5). Esta estructura se ramifica desde la zona de inflexión del corrimiento 8 de la etapa anterior. Su rumbo es oblicuo a la dirección de compresión hasta que, sobre la zona de transferencia subyacente, se une con el frente de deformación preexistente, que permanece activo.

En forma simultánea con esta estructura, se forman los retrocorrimientos 12 y 13 (Fig. 4f). El primero de ellos se produce en secuencia respecto al retrocorrimiento 9 de la etapa anterior, y puede observarse en las secciones E y F de la figura 5. Su rumbo es

perpendicular a los esfuerzos aplicados, y se interrumpe al alcanzar la zona de inflexión de la estructura previa de la secuencia. El segundo se desarrolla en secuencia con los retrocorrimientos 7 y 10 identificados (Fig. 4h); su geometría en planta es consistente con la inflexión que presenta más al este del modelo la zona de acomodación entre hemigrabenes, al igual que los retrocorrimientos previos de esta secuencia.

La compresión se detuvo al alcanzarse los 9,2 cm de acortamiento, habiéndose formado en esta última etapa las estructuras de la figura 4g. El corrimiento 14 alcanza la superficie del modelo entre el corrimiento 8 y el retrocorrimiento 9 identificados en la figura 4e. Se origina en la intersección del plano de despegue basal y el retrocorrimiento 7 del sector sur del modelo (Fig. 4h y secciones E y F de la figura 5). Su extensión en sentido N-S y su rumbo es similar al de esta última estructura y se forma fuera de secuencia, teniendo en cuenta que alcanza la superficie al oeste del frente de deformación previo, afectando a fallas previas del sistema (secciones D, E, F y G de la figura 5). Simultáneamente se registra la formación de un retrocorrimiento menor (15) que

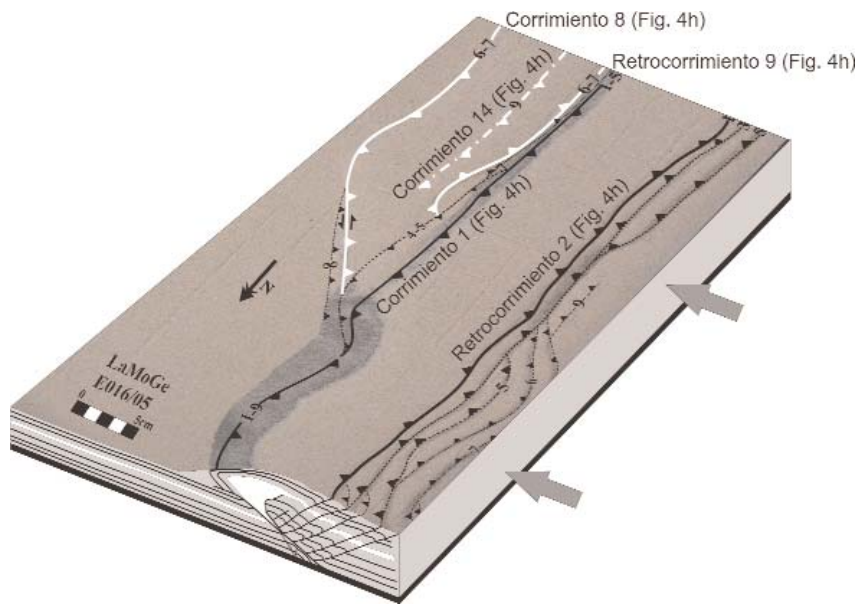


Figura 6: Bloque diagrama en el que se indican los rasgos estructurales principales generados. Se numeran los corrimientos identificados de acuerdo a su orden de aparición y la persistencia de su actividad en relación al resto. En línea discontinua blanca se destaca el corrimiento fuera de secuencia. Véase explicación en el texto.

se bifurca del retrocorrimiento 13 formado durante la etapa anterior.

En la figura 4h puede observarse el estado final del experimento. Los rasgos estructurales principales pueden ser resumidos en dos estructuras de tipo *pop-up*, conformadas por un corrimiento y un retrocorrimiento conjugado cada una, y por un corrimiento fuera de secuencia (Fig. 6). La localización del corrimiento fuera de secuencia será discutida en la próxima sección. Un primer análisis del arreglo estructural obtenido permite subrayar que el control ejercido por el sistema extensional es fuerte hacia el norte, donde el hemigraben basal se encuentra próximo a la zona de empuje, limitando el avance de la deformación hacia el este. Este control se disipa progresivamente hacia el

sur del modelo, donde los corrimientos generados se independizan de la estructura subyacente a medida que ésta se aleja del pistón, desarrollándose corrimientos y retrocorrimientos con rumbos perpendiculares al esfuerzo aplicado. La geometría general del sistema muestra una mayor expansión de la deformación en el sector sur, mientras que hacia norte del modelo la estructuración se encuentra limitada por la anisotropía impuesta en la base.

Es de interés asimismo destacar que en el sector de intersección de los dos trenes estructurales dominantes (Fig. 6) se observa un alto topográfico (Fig. 7). El mismo se encuentra acentuado por la concentración de retrocorrimientos desarrollada al oeste de la zona de transferencia entre los dos



Figura 7: Distintas vistas del modelo deformado. Se indica el sector sobreelevado, coincidente con la intersección entre los dos trenes estructurales principales (Fig. 6). En la fotografía de la derecha se muestra la posición del corte de la figura 10a.

hemigrábenes (Figs. 4h y 6).

DISCUSIÓN

Los resultados experimentales descriptos nos permiten analizar las geometrías e interpretar los procesos resultantes de la aplicación de esfuerzos compresivos cuya dirección es oblicua a estructuras extensionales previas. La arquitectura estructural obtenida puede ser compleja, y no consiste necesariamente en la reactivación de las fallas normales. Las fallas de basamento imponen sí condiciones que influyen y controlan las geometrías resultantes durante la etapa compresiva. Su influencia induce a la generación de cambios de rumbo de las estructuras, variaciones en las dimensiones de las láminas de corrimiento y formación de corrimientos fuera de secuencia, entre otras anomalías que se describirán a continuación. Se presentan también en esta sección comparaciones a diversas escalas entre los resultados del modelo y la estructura del sector sur de la faja plegada y corrida de Malargüe.

Es necesario plantear aquí las limitaciones inherentes al método utilizado: en primer lugar, aún cuando se registraron similitudes entre las geometrías observadas en los modelos y en los ejemplos naturales considerados, esto no implica en sí mismo la actuación de mecanismos de deformación comunes, y es necesario reunir un mayor volumen de información tanto experimental como de campo para reforzar algunas de las ideas que se plantean a continuación. En segunda instancia, se resalta que durante la generación del sistema extensional en los modelos, la configuración de las láminas de acetato basales fuerza arreglos estructurales excesivamente sencillos en el material suprayacente. No obstante, su esquema simple permite un análisis más acabado del proceso de inversión y un mayor control de los factores que la gobiernan.

REACTIVACIÓN DE FALLAS NORMALES

En los experimentos desarrollados se observa una reactivación parcial de las fallas normales previas limitada a dos sectores, involucrando en ambos casos a la falla ma-

estra próxima al pistón. Esta leve reactivación se registra en las secciones A y D de la figura 5, ya que ambas atraviesan zonas de características dinámicas comunes: la sección A cruza al hemigraben "a" en su extremo más próximo al pistón, y la sección D corta al hemigraben "b" sobre su extremo más próximo al frente de deformación preexistente (corrimiento 5), el cual representa la posición desde la cual se propagan los esfuerzos en esa etapa de la evolución del sistema. En el resto del esquema extensional no se registran reactivaciones. Brun y Nalpas (1996) concluyen a partir de sus experimentos que cuando la dirección de compresión forma un ángulo menor a 45° con respecto al rumbo de las fallas de alto ángulo que limitan un graben, hay reactivación efectiva de estas estructuras con un desplazamiento oblicuo. En el presente trabajo se observa rotación de bloques, generando una zona de cizalla transcurrente senestral en el frente del hemigraben "b" (Figs. 4h y 6). Las diferencias observadas respecto a los resultados de Brun y Nalpas (1996) radican en la utilización de métodos experimentales distintos, ya que dicho trabajo localiza la compresión en el borde del graben a partir de una lámina basal que culmina por debajo del mismo, mientras que en este trabajo el empuje por medio de un pistón permite que se produzca deformación en el sector interno antes de alcanzar la posición del hemigraben. Este esquema experimental es similar al presentado por Panien *et al.* (2005), aunque los resultados del presente trabajo son algo diferentes, como se discutirá en la sección siguiente. No obstante, como se observa en los cortes A, C y D de la figura 5, el bloque yacente del hemigraben de basamento se traslada pasivamente sobre la envolvente de los bloques caídos del bloque colgante, reactivando parcialmente la falla maestra del mismo, análogamente a lo descrito por Panien *et al.* (2005).

CONTROL EJERCIDO POR EL SISTEMA EXTENSIONAL

El bajo grado de inversión registrada en fallas normales del modelo no implica que no exista un fuerte control del sistema extensional subyacente sobre la geometría del

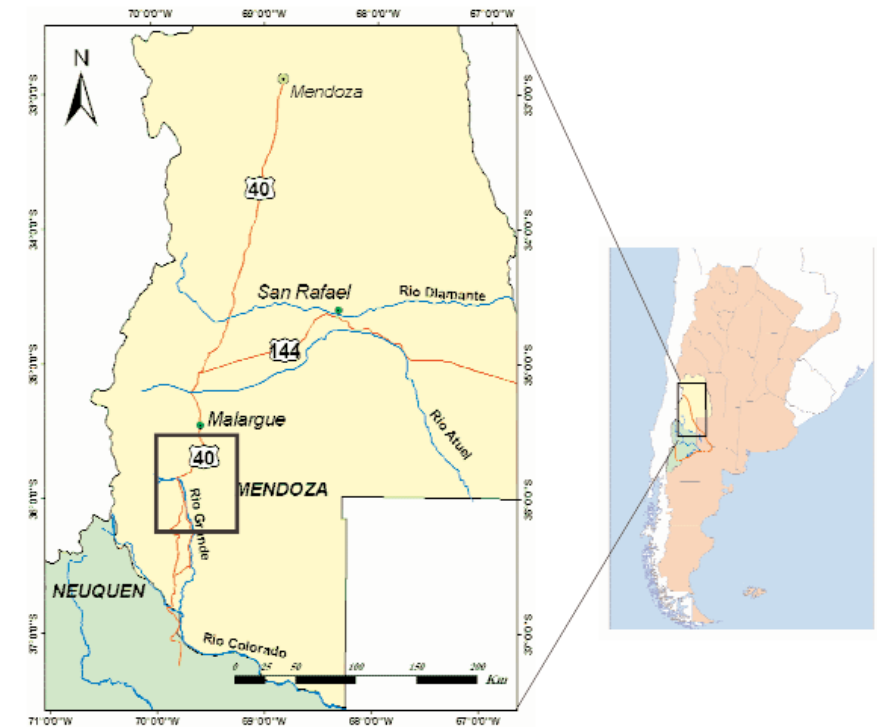


Figura 8: Mapa de ubicación de la zona de estudio.

esquema compresivo superpuesto. Se describió detalladamente en este trabajo la presencia de fallas inversas oblicuas a los esfuerzos compresivos aplicados, con rumbos en todos los casos similares a los de los ejes de los hemigrabenes preexistentes. Este arreglo refleja la utilización de la envolvente de los bloques fallados (Fig. 2) como despegue de los nuevos corrimientos. Esto puede observarse claramente en el sector ocupado por el hemigraben "a" (sección A de la figura 5), donde la mayor parte del acortamiento fue absorbido por el corrimiento 1, fuertemente controlado por la geometría del hemigraben, y el resto por seis retrocorrimientos conjugados, con igual rumbo. El primero de ellos (retrocorrimiento 2 de la figura 4b) se presenta en este sector llamativamente más próximo al corrimiento 1 que en el resto de su traza hacia el sur, mostrando que se encuentra controlado por el ancho del hemigraben subyacente. A diferencia de otros modelos de inversión oblicua, en los que la dirección de las estructuras previas es la única presente luego de la compresión (Panien *et al.*, 2005), las dos estructuras resaltadas en la figura 4b se independizan del rumbo del sistema exten-

sional al sur de la zona de transferencia, adoptando en ese sector un rumbo N-S, perpendicular a los esfuerzos compresivos aplicados. Esta misma conducta se repite para el corrimiento 8 y el retrocorrimiento 9 de la figura 4e, cuyos rumbos se disponen paralelos al pistón al incrementarse la distancia entre la estructura subyacente y el frente de empuje.

De acuerdo a los experimentos realizados por Nieuwland *et al.* (2000), la presencia de un escalón de basamento por delante de un frente de corrimientos activo funciona como un sitio de nucleación de los próximos corrimientos. La transmisión de los esfuerzos desde el frente de deformación hasta el escalón de basamento para permitir esta nucleación no siempre es efectiva, dependiendo de la fricción basal del despegue y de la resistencia del material involucrado (Suppe 1985, Nieuwland *et al.* 2000). Los cambios en el rumbo de las estructuras modeladas descritos en este trabajo están vinculados con este fenómeno; la energía necesaria para transportar una lámina de corrimiento sobre su despegue basal hasta activar el límite del hemigraben (envolvente) o bien aprovechar la baja resistencia de su

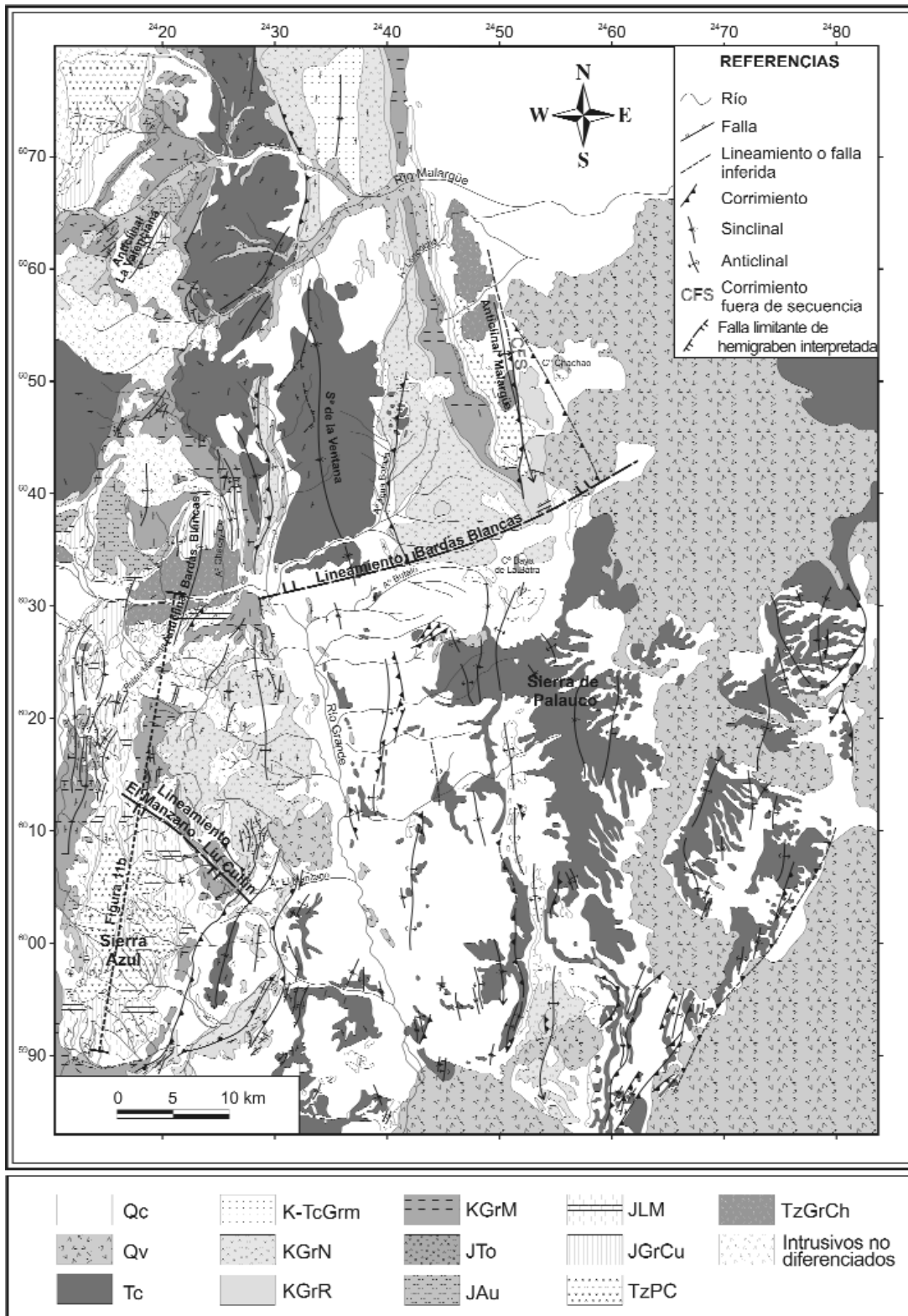


Figura 9: Mapa geológico de la zona de estudio, modificado de Groeber 1937, Dessanti 1973, Legarreta *et al.* 1985, Kozłowski *et al.* 1989, Gulisano y Gutiérrez Pleimling 1994 y Dicarlo 2005. Qc = Cuaternario clástico; Qv = Cuaternario volcánico; Tc = Terciario; K - TcGrm = Grupo Malargüe; KGrN = Grupo Neuquén; KGrR = Grupo Rayoso; KGrM = Grupo Mendoza; JTo = Fm. Tordillo; JAu = Fm. Auquileo; JLM = Fm. La Manga; JGrCu = Grupo Cuyo; TzPC = Precuyano; TzGrCh = Grupo Choiyoi

relleno y fallarlo, aumenta a medida que la línea de debilidad es más lejana al frente de empuje. Existe una distancia crítica a partir de la cual el control basamental deja de ser

energéticamente conveniente y el corrimiento abandona ese control, cambiando de rumbo. Este cambio se observa tanto para el corrimiento 1 primero (Fig. 4b) co-

mo para el 8 más tarde (Fig. 4e), disponiéndose ambos perpendicularmente a la dirección de los esfuerzos al superar una cierta distancia del frente de empuje respectivo.

Por el contrario, cuando la distancia entre el hemigraben subyacente y el frente de empuje es menor a la longitud esperada teóricamente para una lámina de corrimientos bajo las condiciones experimentales empleadas pero sin controles de basamento, el frente de deformación queda determinado por el control basal impuesto. Esto ocurre en el sector norte del modelo, donde se reactiva el hemigraben "a" mediante el corrimiento 1, y la deformación no se propaga más allá de este control (Figs. 4b y 4h). Otro resultado de interés obtenido es la formación del corrimiento fuera de secuencia (corrimiento 14, Figs. 4g y 6). Esta falla tiene un rumbo paralelo al pistón y afecta a la lámina de corrimientos controlada por el corrimiento 8, abarcando en sentido N-S la misma extensión que el tramo N-S del mismo. La longitud de esta lámina es mayor a la esperada para un sistema de características físicas similares pero sin estructuras preexistentes, aun teniendo en cuenta, como se dijo anteriormente, que el corrimiento 8 abandona el control del hemigraben basal al cambiar de rumbo. Su extensión anómala fue "forzada" por el control oblicuo subyacente, y es entonces esperable que no sea suficientemente resistente como para mantener su dimensión y se falle al aumentar el acortamiento aplicado, recuperando así el equilibrio del sistema. Esto explica que el corrimiento fuera de secuencia abarque solamente el sector sur del modelo y no continúe hacia en norte, donde la estructura infrayacente controló el rumbo del corrimiento 8 (Fig. 6).

COMPARACIÓN CON EJEMPLOS NATURALES. FAJA PLEGADA Y CORRIDA DE MALARGÜE

Distintos investigadores que trabajaron en el sector sur de la faja plegada y corrida de Malargüe (Fig. 8) concuerdan en proponer un estilo de deformación dominante de piel gruesa (Kozłowski *et al.* 1993; Mingramm *et al.* 1993, Manceda y Figueroa 1993, Dimieri, 1997, Silvestro y Kraemer 2005). Su arreglo estructural fue tradicionalmente interpretado como controlado por hemigrábenes con ejes meridianos, cuyas fallas principales fueron invertidas durante la orogenia andina, conformando de este modo las grandes es-

tructuras de la región (Sierra Azul, sierra de Palauco, anticlinal de Malargüe, anticlinal la Valenciana; Fig. 9). El origen de estos sistemas extensionales estaría relacionado, como respuesta local, con la separación de Gondwana (Dalziel 1986, Uliana *et al.* 1989). En la cuenca Neuquina el pulso principal de extensión se desarrolló durante el Triásico superior - Jurásico inferior, siendo su orientación dominante un reflejo de los lineamientos preexistentes (Dalziel 1986, Ramos 1989, 1999, Uliana *et al.* 1989). Este

tren principal, de orientación nor-noroeste, presenta, sin embargo, variaciones locales dentro de la cuenca, desarrollándose fallas maestras con direcciones cambiantes, como puede observarse en secciones sísmicas (Uliana *et al.* 1989). En el área de estudio, Manceda y Figueroa (1993) registran a partir de datos de subsuelo la existencia de depocentros jurásicos asimétricos bien diferenciados, separados por altos estructurales interpretados como zonas de acomodación (Fig. 10a). Dentro de estas últimas se reco-

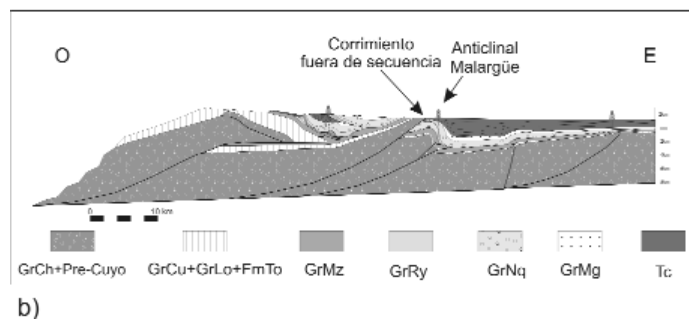
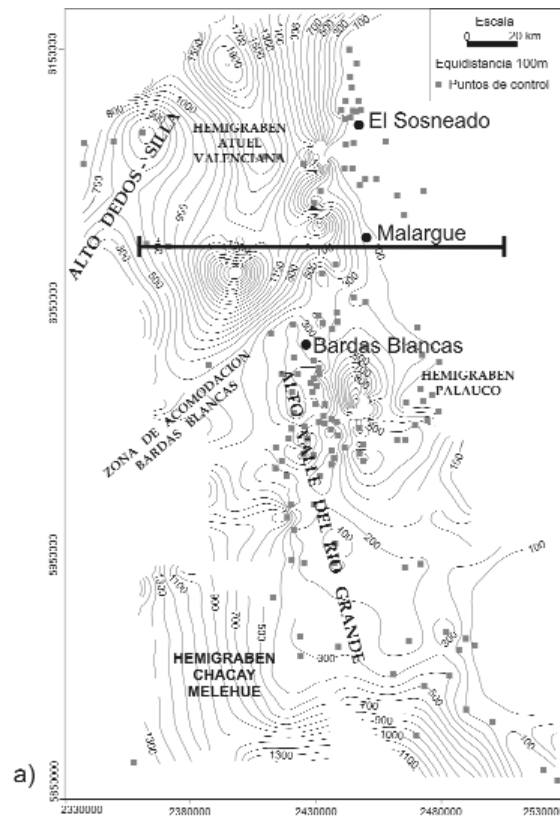


Figura 10: a) Mapa isopáquico palinspastizado del ciclo jurásico, basado en datos de pozos y perfiles de superficie. Tomado de Manceda y Figueroa, 1993. b) Corte estructural a la latitud del río Malargüe. Se destaca el corrimiento fuera de secuencia afectando al anticlinal Malargüe. Ubicación del corte en la figura a. Modificado de Silvestro y Kraemer 2005. GrCh = Grupo Choiyoi; GrCu = Grupo Cuyo; GrLo = Grupo Lotena; FmTo = Formación Tordillo; GrMz = Grupo Mendoza; GrRy = Grupo Rayoso; GrNq = Grupo Neuquén; GrMg = Grupo Malargüe; Tc = Terciario.

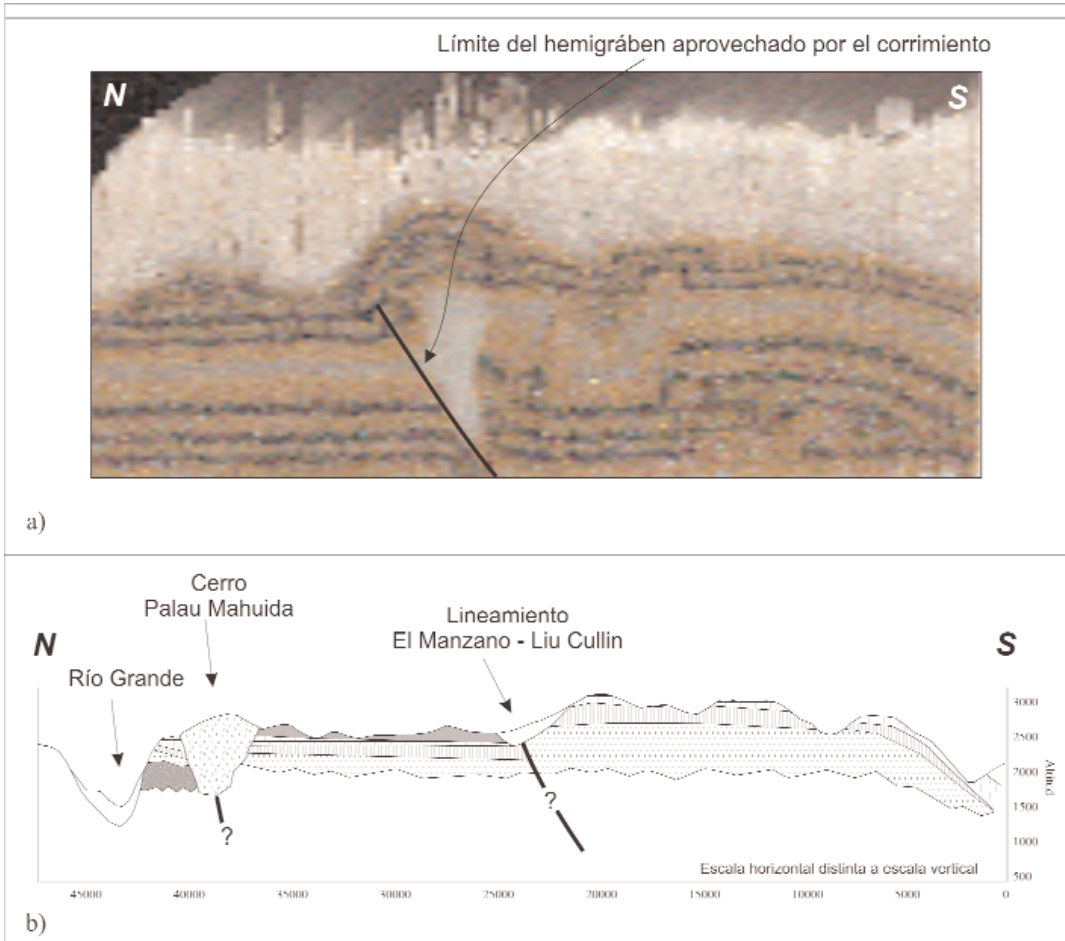


Figura 11: a) Corte N-S del modelo generado mediante el programa GENERADOR.exe (ubicación del corte en la figura 7). Los sedimentos blancos superiores se agregaron luego de la deformación para proteger la estructura del modelo al seccionarlo. Se destaca la mayor altura alcanzada en el sector sur del corte b) Sección esquemática paralela al eje de la sierra Azul (véase ubicación en el mapa de la figura 9) donde se observa el cambio de nivel estructural en el lineamiento El Manzano-Liu Cullín. La exageración vertical es 3,5x en ambas secciones.

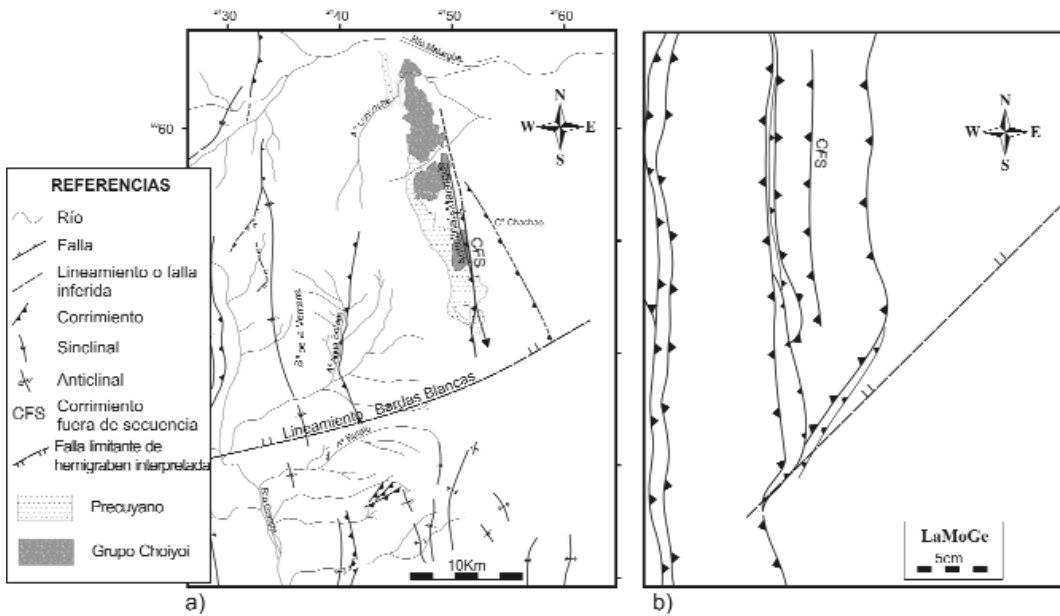


Figura 12: a) Mapa estructural de la zona de trabajo, modificado de Legarreta *et al.* (1985), Kozłowski *et al.* (1989), Gulisano y Pleimling (1994) y Dicarlo (2005). Se destaca la ubicación sugerida del límite sur del hemigráben (lineamiento Bardas Blancas) y del CFS afectando al anticlinal Malargüe. b) Resultado estructural del modelo análogo ya presentado en la figura 4h, aquí dispuesto especularmente para su mejor comparación con el prototipo de campo de la figura a. Se resalta la posición de la falla normal principal subyacente y del CFS.

nocen orientaciones N-S así como también ENE (zona de acomodación Bardas Blancas). En base a indicios de campo e información de subsuelo, algunos autores han

propuesto que los depocentros triásico-jurásicos del sector norte de la cuenca Neuquina, hoy abarcados por la faja de Malargüe, presentaban direcciones NNO (Álva-

rez *et al.* 2002; Giambiagi *et al.* 2005), así como también en las sierras de Cara Cura y de Reyes orientaciones ENE y ESE, estos últimos sin evidencias de inversión (Pán-

garo y Pereira 2006, comunicación personal). La arquitectura estructural de estos depocentros habría ejercido un importante control sobre el estilo estructural de esta faja (Pángaro 2004, comunicación personal, Cristallini *et al.* 2004, Giambiagi *et al.* 2005). Se analizarán a continuación dos lineamientos que podrían responder a este esquema: el lineamiento El Manzano - Liu Cullín y el lineamiento Bardas Blancas (Fig. 9).

ALTURA ESTRUCTURAL Y AVANCE DE LA DEFORMACIÓN: LINEAMIENTO EL MANZANO - LIU CULLÍN

El lineamiento El Manzano - Liu Cullín presenta un rumbo NO, separando un sector al sur de la sierra Azul más elevado estructuralmente que el sector norte (Fig. 9). Esta lineación podría estar indicando la presencia de una rampa oblicua a la dirección de compresión ándica, generada durante la etapa extensional triásico - jurásica.

Como se observa tanto en la figura 7 como en el corte longitudinal de la figura 11a, en los modelos realizados se obtuvo una mayor altura estructural en el sector sur, donde la deformación tuvo mayor espacio para avanzar, es decir, donde el hemigraben se encuentra a mayor distancia del frente de empuje. Análogamente, en la sierra Azul se observa que el área al sur del lineamiento El Manzano-Liu Cullín se encuentra más elevada estructuralmente que al norte, poniendo en contacto lateral a la Formación La Manga con la Formación Agrijo (Fig. 11). En un perfil paralelo al eje de la sierra (Fig. 11b), se observa que los principales afloramientos precuycanos aparecen hacia el sur del lineamiento, mientras que al norte, en la localidad de Bardas Blancas sobre el río Grande, su espesor no supera los 60 metros. Esto sugiere que el lineamiento en cuestión podría haber funcionado como límite de hemigraben, controlando la sedimentación durante la etapa de subsidencia mecánica de la cuenca, o bien podría haber constituido una zona de transferencia entre depocentros del rift. La comparación planteada en la figura 11 muestra que el arreglo estructural obtenido en los modelos, donde el sector sur se encuentra más levantado que el sector norte, y el relleno del hemigra-

ben oblicuo sufrió levantamiento, concuerda con la primera de estas hipótesis.

LINEAMIENTO BARDAS BLANCAS

El otro lineamiento estudiado, de mayor magnitud que el anterior y rumbo ENE, es la denominada zona de acomodación Bardas Blancas por Manceda y Figueroa (1993), que limita los hemigrabenes de Atuel-La Valenciana del hemigraben de Palauco (Fig. 10a). Estos autores observan que existen, por un lado, hemigrabenes invertidos tectónicamente como los depocentros Atuel-La Valenciana y Palauco, y también otras estructuras positivas de rango similar, como Sierra Azul-Bardas Blancas, que no se corresponden con zonas de máximos espesores del ciclo jurásico. A partir de mapas isopáquicos palinostizados del relleno del rift jurásico y de secciones estructurales balanceadas, proponen la existencia de cambios de vergencia abruptos controlados por la estructura del rift, lo cual se refleja claramente en las relaciones existentes en sentido N-S. En este trabajo se propone que el arreglo estructural observado es coherente con considerar al lineamiento Bardas Blancas como una falla maestra de la extensión triásico-jurásica, y no una zona de transferencia entre hemigrabenes de rumbo norte sur.

Asumiendo que el lineamiento Bardas Blancas responde a la existencia de una falla normal de basamento que controla al depocentro Atuel-La Valenciana (Fig. 10a), es posible comprender la formación del corrimiento fuera de secuencia que corta al anticlinal Malargüe (Fig. 10b) aplicando los resultados experimentales obtenidos en este trabajo (Fig. 12). Como vemos en el mapa estructural de la figura 12a, el corrimiento se interrumpe y no se extiende hacia el sur del lineamiento. Por otro lado, los espesores de los sedimentos jurásicos muestran una marcada disminución en esa dirección (Fig. 10a), por lo cual no existen evidencias para considerar al anticlinal Bardas Blancas como una estructura originada por inversión de un hemigraben preexistente, sino que por el contrario este sector de la cuenca habría ocupado una posición elevada durante el Jurásico (Manceda y Figueroa 1993, Silvestro y Kraemer 2005). Este esquema es

compatible con los resultados experimentales resumidos en la figura 12b, donde el corrimiento fuera de secuencia abarca solamente el sector norte del modelo y se propaga hacia el sur del control oblicuo subyacente.

CONCLUSIONES

Los modelos análogos planteados simulan la compresión oblicua de dos hemigrabenes vinculados por una zona de transferencia. Los resultados obtenidos muestran que en los sectores del modelo donde las estructuras subyacentes se encuentran próximas al frente de empuje, las primeras ejercen un fuerte control sobre los corrimientos y retrocorrimientos conjugados generados durante la etapa compresiva. La eficiencia de este control se pierde al aumentar la distancia entre el frente y las estructuras basales, permitiendo que tanto los corrimientos como los retrocorrimientos adopten rumbos perpendiculares a la dirección de los esfuerzos, independientes de los hemigrabenes subyacentes.

En las zonas donde el control es efectivo, se registran muy leves reactivaciones de las fallas normales previas, y los corrimientos desarrollados aprovechan la envolvente de los bloques fallados constituyentes del bloque colgante de los hemigrabenes.

La presencia de un lineamiento oblicuo a la compresión en el basamento induce un avance asimétrico del frente de deformación, con un sector de mayor propagación de la deformación con respecto al otro, así como también de mayor levantamiento.

Se propone una explicación que vincula la formación y localización de un corrimiento fuera de secuencia con la geometría de la estructura oblicua subyacente.

Los resultados obtenidos apoyan la hipótesis de considerar trenes de extensión oblicuos (tanto NE como NO) y no meridianos para la estructuración extensional triásico - jurásica del sector sur de la faja plegada y corrida de Malargüe.

AGRADECIMIENTOS

A Repsol-YPF por el apoyo y la información brindada, a CONICET, UBA y Fundación Antorchas, que permiten continuar

con estos desarrollos, a Víctor García, Matías Ghiglione y Carmen Martínez Dopico por la dedicación puesta en la lectura, corrección y mejoramiento de las versiones preliminares de este trabajo, y a los árbitros Lic. Francisco Pángaro y Dra. Laura Giambiagi, quienes aportaron valiosas críticas, comentarios y sugerencias, útiles tanto para mejorar este trabajo como para encarar las etapas próximas de nuestra investigación.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Álvarez, P.P., Giambiagi, L.B., E. Godoy y V.A. Ramos., 2002. Tectosedimentary evolution of Triassic Jurassic extensional basins in the high Andes of Argentina and Chile (32°-34°SL). 5° International Symposium on Andean Geodynamics, Proceedings 27-30, Toulouse.
- Amilibia, A., McClay, K.R., Sàbat, F., Muñoz, J.A., Roca, E., 2005. Analogue modeling of inverted oblique rift systems. *Geological Acta* 3 (3), 251-271.
- Brun, J.P., Nalpas, T. 1996. Graben inversion in nature and experiments. *Tectonics* 15: 677-687.
- Byerlee, J. 1978. Friction of rocks. *Pure and Applied Geophysics* 116: 615-626.
- Buchanan, P.G. y McClay, K.R. 1991. Sandbox experiments of inverted listric and planar fault systems. *Tectonophysics* 188: 97-115.
- Cristallini, E., Yagupsky, D., Baradé, R., Zamora Balcarce, G. y Ramírez, J. 2004. Modelado Estructural en el Norte de Neuquén y Sur de Mendoza: Incorporación de Nuevas Líneas Exploratorias. YPF Informe interno preliminar inédito, 12p., Buenos Aires.
- Cristallini, E.O. 2006. Software inédito utilizado en el Laboratorio de Modelado Geológico, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires.
- Dahlen, F.A., Suppe, J. y Davis, D.M. 1984. Mechanics of fold/thrust belts and accretionary wedges: Cohesive Coulomb theory. *Journal of Geophysical Research* 89: 10087-10101.
- Dalziel, I. 1986. Collision and Cordilleran orogenesis: an Andean perspective. En Coward, M. y Ries, J. (eds.) *Collision Tectonics*, Geological Society, Special Publication 19: 389-404, London.
- Davis, D., Suppe, J. y Dahlen, F.A. 1984. Mechanics of fold-and thrust belts and accretionary wedges: Cohesive Coulomb theory. *Journal of Geophysical Research* 89: 11087-11111.
- Dessanti, R.N. 1973. Descripción geológica de la Hoja 29b Bardas Blancas (Provincia de Mendoza). Servicio Nacional Minero Geológico, Boletín 139: 1-70.
- Dicarlo, D. 2005. Estructura y Geología en la margen Norte del Río Grande, Área de Bardas Blancas, Provincia de Mendoza. Trabajo Final de Licenciatura, Universidad de Buenos Aires, (inédito) 121 p., Buenos Aires.
- Dimieri, L. 1997. Tectonic wedge geometry at Bardas Blancas, southern Andes (36°S), Argentina. *Journal of Structural Geology* 19 (11): 1419-1422.
- Dubois, A., Odonne, F., Massonnat, G., Lebourg, T., Fabre, R. 2002. Analogue modelling of fault reactivation: tectonic inversion and oblique remobilisation of grabens. *Journal of Structural Geology* 24: 1741-1752.
- Eisenstadt, G. y Withjack, M.O. 1995. Estimating inversion: results from clay models. En Buchanan, J.G.B. y Buchanan, P.G. (eds.) *Basin Inversion*, Geological Society, Special Publication 88: 119-136, London.
- Giambiagi, L., Alvarez, P.P., Bechis, F. y Tunik, M. 2005. Influencia de las estructuras de rift triásico-jurásicas sobre el estilo de deformación de las fajas plegadas y corridas de Aconcagua y Malargüe, Mendoza. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 60(4): 662-671.
- Groeber, P. 1937. Mapa Geológico de la Hoja 30c (Puntilla del Huincan). Mapa Geológico General de la República Argentina, Dirección Nacional de Minería y Geología, Buenos Aires.
- Gulisano, C.A. y Gutierrez Pleimling, A.R. 1994. The Jurassic of the Neuquén Basin. *Asociación Geológica Argentina, Field guide, Serie E 3*, 113 p. - Secretaría de Minería de la Nación, Publicación 159, 113 p., Buenos Aires.
- Hubbert, M.K. 1937. Theory of scale models as applied to the study of geologic structures. *Geological Society of America, Bulletin* 48: 1459-1520.
- Hubbert, M.K. 1951. Mechanical basis for certain familiar geologic structures. *Geological Society of America, Bulletin* 62: 355-372.
- Huiqi, L., McClay, K.R. y Powell, D. 1992. Physical models of thrust wedges. En McClay, K.R. (ed.) *Thrust tectonics*, Chapman and Hall, 71-81, London.
- Koopman, A., Speksnijder, A. y Horsfield, W.T. 1987. Sandbox model studies of inversion tectonics. *Tectonophysics* 13: 379-388.
- Kozłowski, E., Cruz, C., Condat, P. y Manceda, R. 1989. Informe geológico zona Malargüe Occidental. YPF, (informe interno inédito) 47 p., Buenos Aires.
- Kozłowski, E., Manceda, R. y Ramos, V. 1993. Estructura. En Ramos, V. (ed.) *Geología y Recursos Naturales de Mendoza*, 12° Congreso Geológico Argentino y 2° Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Relatorio 235-256, Buenos Aires.
- Krantz, R.W. 1991. Measurements of friction coefficients and cohesion for faulting and fault reactivation in laboratory models using sand and sand mixtures. *Tectonophysics* 188: 203-207.
- Legarreta, L., Kokogian, D. y Boggetti, D. 1985. Informe Sierra de Palauco. Estratigrafía. Provincia de Mendoza. YPF (informe interno inédito) 103 p., Buenos Aires.
- Manceda, R. y Figueroa, D. 1993. La inversión del rift mesozoico en la faja fallada y plegada de Malargüe, Provincia de Mendoza. 12° Congreso Geológico Argentino y 2° Congreso de exploración de Hidrocarburos (Mendoza), Actas 3: 219-232, Buenos Aires.
- McClay, K.R. y Buchanan, P.G. 1992. Thrust faults in inverted extensional basins En McClay, K.R. (ed.) *Thrust Tectonics*, Chapman and Hall, 93-114, London.
- Mingramm, A.R.G., Gonzalez Segura, J. y Nocioni, A. 1993. Foldbelt tectonics of the Malargüe Area, Central West Argentina. 12° Congreso Geológico Argentino y 2° Congreso de exploración de Hidrocarburos (Mendoza), Actas 3: 179-187.
- Mitra, S. y Islam, Q.T. 1994. Experimental (clay) models of inversion structures. *Tectonophysics* 230: 211-222.
- Nieuwland, D.A., Leutscher, J.H. y Gast, J. 2000. Wedge equilibrium in fold-and-thrust belts: prediction of out-of-sequence thrusting based on sandbox experiments and natural examples. *Geologie en Mijnbouw, Netherlands Journal of Geosciences* 79 (1): 81-91.
- Panien, M., Schreurs, G. y Pfiffner, A. 2005. Sandbox experiments on basin inversion: testing the influence of basin orientation and basin fill. *Journal of Structural Geology* 27 (3): 433-445.
- Ramberg, H. 1981. Gravity, Deformation and the Earth's Crust. Academic Press, 2nd. ed., 452 p., London.
- Ramos V. A. 1989. The birth of southern South

- America: *American Scientist* 77: 444-450.
- Ramos, V.A. 1999. Plate tectonic setting of the Andean Cordillera. *Episodes* 22(3): 183-190.
- Sandford, A.R. 1959. Analytical and experimental study of simple geologic structures. *Geological Society of America, Bulletin* 70: 19-52.
- Sassi, W., Colletta, B., Balé, P. y Paquereau, T. 1993. Modelling of structural complexity in sedimentary basins: The role of pre-existing faults in thrust tectonics. *Tectonophysics* 226: 97-112.
- Silvestro, J. y Kraemer, P. 2005. Constraining the Neogene evolution of the Central Andes fold belt between 35°-36°S using top-wedge-growth strata record, Malargüe, Argentina. 6° International Symposium on Andean Geodynamics (ISAG 2005, Barcelona), *Extended Abstracts*: 670-672.
- Suppe, J. 1985. *Principles of structural geology*. Prentice Hall, 536 p., Englewood Cliffs.
- Uliana, M. A., Biddle, K. T. y Cerdán, J. 1989. Mesozoic Extension and the Formation of Argentine Sedimentary Basins. En Tankard, A.J. y Balkwill, H. R. (eds.) *Extensional tectonics and stratigraphy of the north Atlantic margins*, American Association of Petroleum Geologists, *Memoir* 46: 599-614.
- Yrigoyen, M. 1972. Cordillera Principal. En Leanza, A. (ed.) *Geología Regional Argentina*, Academia Nacional de Ciencias, 651-693, Córdoba.

Recibido: 25 de julio, 2006

Aceptado: 14 de septiembre, 2006