Formación e inversión de cuencas sinclinales con sal pre-cinemática. Resultados experimentales aplicados a la Cuenca de las Columbrets (Mediterráneo Occidental)

Formation and inversion of extensional syncline basins with pre-kinematic salt. Experimental results and application to the Columbrets Basin (Western Mediterranean)

M. Roma¹, E. Roca¹, O. Ferrer¹, O. Pla¹ y M. Butillé¹.

1 Institut de Recerca GEOMODELS – Grup de Geodinàmica i Anàlisis de Conques. Departament de Geodinàmica i Geofísica, Facultat de Geologia, Universitat de Barcelona (UB), C/ Martí i Franqués s/n, 08028, Barcelona. <u>mariaroma@ub.edu</u>

Resumen: La extensión Jurásico – Cretácico Inferior que tuvo lugar en Europa y en el Atlántico Norte dio lugar a la formación de varios sistemas de rift. Asociados a estos y a la presencia de evaporitas en la parte basal de su relleno sedimentario, es común el desarrollo de cuencas sinclinales en el bloque superior de las fallas principales. Posteriormente, algunas de estas cuencas fueron parcialmente invertidas e incorporadas a cinturones de pliegues y cabalgamientos durante el Cretácico tardío y Cenozoico. A partir de una aproximación experimental basada en modelos analógicos y utilizando la Cuenca de las Columbres como análogo natural, el objetivo de esta investigación es doble: 1) determinar el papel que juega la sal en el desarrollo de esta cuenca sinclinal, y 2) caracterizar la posterior inversión de esta cuenca sinclinal considerando diferentes espesores del nivel salino.

Palabras clave: Cuencas sinclinales, extensión, inversión, modelos analógicos, Cuenca de las Columbrets.

Abstract: The widespread extensional deformation that took place during Jurassic to Cretaceous times in the Western Europe and the North-Atlantic resulted in the formation of several rift systems. Associated with them and related to the presence of evaporites on the lower part of their sedimentary infill, is usual the development of synclinal basins in the hangingwall of the major faults. Later on, some of these basins were partially inverted and often incorporated into thrust-and-fold belts during late Cretaceous – Cenozoic times. Based on analogue models and using the Columbrets Basin as a case study, the objective of this research is twofold: 1) to determine the role of a pre-kinematic salt layer in the development of these synclinal basin; and 2) to characterize the subsequent basin inversion considering different salt thicknesses.

Key words: Syncline basin, extension, inversion, analogue models, Columbrets Basin.

INTRODUCCIÓN

En los sistemas de rift de Europa Occidental y del Atlántico Norte es común la presencia deamplias cuencas sinclinalescomo resultado del periodo extensivo que tuvo lugar entre el Jurásico tardío y el Cretácico Inferior.Estas cuencas suelen presentarun nivel salino sin- opre-rift (sal Pérmica, facies Zechtein osal Triásica Superior, facies Keuper)cerca de la base del relleno sin-rift (Ziegler, 1988; Clark et al., 1998). Posteriormente a su formación algunas de estas cuencas sinclinales fueron afectadas por un episodio de deformación contractiva durante la orogenia Alpina (Cretácico Superior-Cenozoico) provocando su inversión en diferentes grados (ej. cuencas del *Mid*-PolishTrough, BroadFourteens, Parentis o de las Columbrets) e incluso en algunos casos, como por ejemplo en las cuencas de Organyà y Cameros, que fueron incorporadasa un cinturón de pliegues y cabalgamientos.

Actualmente los datos sísmicos y de campo, permiten precisar la geometría de la mayor parte de estas cuencas sinclinales, pero no la de las fallas extensionales o zonas de cizalla que las originaron. En la literatura, la forma y la cinemática de las fallas extensivas se ha establecido usando la geometría de los materiales pre- y sin-cinemáticos más superficiales asumiendo un completo acoplamiento entre basamento y cobertera (Tankard yWelsink, 1989). Sin embargo existen pocas interpretaciones que consideren el papel que juega un nivel salino profundo desacoplando la deformación entre basamento y cobertera. Esto contrasta con los datos de las cuencas sinclinales comentadas previamente que muestran que la sal actúa como un nivel dedesacople efectivogenerando dos dominios estructurales claramente diferenciados: uno de piel gruesa que involucra al basamento y otro de piel fina involucrando la cobertera (Soto et al., 2007; Ferrer etal., 2016).

Este trabajo pretende descifrar el papel que desempeña la sal pre-cinemática en el desarrollo

einversión de un sinclinal generado por una falla extensiva de bajo ángulo formada por tres paneles que generan un pliegue de falla superior cóncavo y uno inferior convexo.

Para lograr estos objetivos, y utilizando la Cuenca de las Columbrets (Mediterráneo Occidental) como análogo natural, se ha diseñado un programa experimental de modelos de arena considerado diferentes espesores de silicona (material análogo de la sal en la naturaleza), dejando fija tanto lageometría de la falla de basamento como la cantidad y velocidad de extensióneinversión.

LA CUENCA DE LAS COLUMBRETS

La Cuenca de las Columbrets se encuentra en la parte suroeste del Surco de Valencia en el Mediterráneo Occidental, y es una Cuenca intracontinental desarrollada durante el Mesozoico, en el margen noroeste del Tethys (Fig. 1). Está formada por un relleno sedimentario de más de 8.5 km de potencia, de edades comprendidas entre elTriásico Superior y el CretácicoSuperior (Roca, 2001). La parte inferior del relleno sedimentario yace sobre una corteza muy delgada (menos de 4 km de espesor).



FIGURA 1. Mapa estructural del suroeste del Surco de Valencia y de sus alrededores. La posición de la Cuenca de las Columbrets aparece resaltada por el mapa de espesores de la sucesión mesozoica (modificado de Roca, 2001).

La Cuenca de las Columbrets describe un amplio sinclinal afectado por fallas extensivas y contractivas (Fig. 2), despegadas a techo de las evaporitastriásicas que actúan como un nivel de desacoplamiento regional entre el basamento y la cobertera sedimentaria. El

grosor de este nivel es variable a lo largo de la cuenca. Así, bajo el sinclinal seencuentra muy delgado llegando a desarrollar soldaduras primarias, pero también se encuentra engrosado a lo largo de los márgenes del sinclinal donde se desarrollan diapiros y paredes salinas. Por debajo del sinclinal, la parte superior del basamento y las rocas de edad Pérmico-Triásico Inferior que lo recubren, definen la misma geometría sinclinal, pero estás están afectadas por un sistema de fallas extensivas de piel gruesa. Estas fallas no atraviesan el nivel de sal Triásica, excepto en el margen noroccidental de la cuenca, concretamente en el área del Desert de les Palmes (Fig. 2).El desarrollo del sinclinal de la Cuenca de las Columbrets, se puede relacionar con una zona de cizalla o una falla extensiva intra-basamento de bajo ángulo con cambios de buzamiento y dirigida hacia el sureste. Esta falla muestra un desplazamiento de unos 80 km (Fig. 2).

La presencia de una discordancia erosiva pre-Mioceno Medio en la parte superior de la cuenca, así como algunos cabalgamientos presentes en los márgenes de la cuenca que afectan al Paleógeno y a los materiales del Mioceno Inferior, denotan que la cuenca sufrióinversióntectónica durante el Paleógeno hasta el Mioceno temprano.

PROGRAMA EXPERIMENTAL

Se realizaron 7modelos de arena (Tabla. I) que se llevaron a cabo en una caja de deformación de 85 cm de largo, 50 cm de ancho y 12 cm de alto. Dos cristales laterales y dos paredes de metal al extremo del modelo, ortogonales a los cristales, hacen que el experimento sea un sistema cerrado. Los cristales y una de las paredes se mantuvieron fijas durante el experimento, mientras que la otra pared se movía mediante un servomotor a una velocidad constante de 4 mm/hora tanto para la extensión como la inversión (Fig. 3). La geometría de la falla principal se reproduce mediante un bloque de madera rígido e incluye un rampa superior de 30 cm de largo con un buzamiento de 5º y una rampa inferior de 20 cm de longitud con un buzamiento de 20º (Fig. 3). La placa basal de la mesa de modelización reproduce el tercer panel horizontal de la falla principal.

Como materiales análogos se utilizó, arena de sílice seca, con un ángulo de fricción interna de 34°, una densidad de 1500 kg/m³, una cohesión de 60 Pa, y un tamaño de grano medio de 213 micras, el cual es un material excelente para simular las rocas frágiles de la corteza superior. Por otro lado, se utilizó un polímero de silicona con un comportamiento de fluido Newtoniano (PDMS - Rhodosil GUM de Bluestar Silicones) con una densidad de 972 kg/m³, una viscosidad de $1.18 \cdot 10^4 Pa \cdot s$, calculada a 20°C, para simular la sal dúctil (Weijermars, 1986). Los modelos que se presentan están escalados con un factor de proporción para la longitud de 10^{-5} (1cm en el laboratorio representa 1km en la natura).El relleno del bloque superior es el que se muestra en la Fig. 3, con 10,7cm de columna pre-cinemática, formada por capas de arena blanca y coloreada de 3mm de espesor cada una. Cubriendo este paquete pre-cinemáticoy dependiendo del experimento, se depositaron 0.5cmde un nivel de arena verde para los experimentos 1 y 2. En los experimentos 3 y 4 se substituyó este nivel verde por un nivel de 0,5 cm de silicona y 1cm de silicona en los experimentos 5 y 6. Finalmente, en todos ellos se depositaron 3 niveles de arena de 3 mm de espesor que representan la cobertera. Por regla general se aplicaron 20 cm de extensión (excepto en el experimento 7 que fueron 10cm), y se sedimentócada 1cm de extensión (2h50') rellenado solamente las zonas con subsidencia (sin subir el nivel regional) e erosionando los levantamientos provocados por las inflaciones del polímero. Finalmente se aplicaron 9cm de inversión, sin sedimentación sin-tectónica.

Experimento	Espesor de silicona (cm)	Cantidad de inversión (cm)
1	-	-
2	-	9
3	0.5	-
4	0.5	9
5	1	-
6	1	9
7	0.5	-

TABLA I: Tabla resumen de las principales características del programa experimental.

RESULTADOS

Los resultados experimentales muestran que durante la extensión de los modelos con silicona, los sedimentos sin-cinemáticos describen una geometría sinclinal asociada a la rampa de la falla (Fig. 4A y C).



FIGURA 2. Corte geológico regional a través de la Cuenca de las Columbrets. Compuesto por un corte estructural en continente (área del Desert de les Palmes, basado en Roca et al., 1994), y tres perfiles sísmicos utilizados para definir la estructura en mar.



FIGURA 3. Esquema conceptual del aparatoexperimental utilizado, así como los materiales análogos.

Como estructura secundaria, relacionada con el límite del film de plástico (EBS en Fig. 3), se genera un semi-graben. La geometría de este sinclinal varía dependiendo de la cantidad de desplazamiento extensivo aplicado y está fuertemente condicionada porel nivel pre-cinemático de silicona, no solo porque se produce una migración de la silicona, así como el desarrollo de estructuras "salinas", sino porque la silicona actúa como un nivel muy efectivo de desacople.Los experimentos muestran que la silicona migra preferentemente hacia el margen del sinclinal asociado al panel con menor buzamiento ya que la unidad sin-cinemática tiene un espesor menor (Fig. 4A y C). Es por este motivo que el desarrollo de las estructuras "salinas"en todos los experimentos es en el margen de la cuenca situado encima del panel horizontal. Por otro lado, a mayor grosor de silicona, más desarrolladas estarán las estructuras "salinas" y estás también se desarrollarán en el otro margen de la cuenca (Fig. 4C).

La reactivación contractiva de la falla principal muestra la formación de una doble cuña cabalgante (inversión del semi-graben) controlada por la terminación frontal del nivel de polímero y por las fallas de colapso de los diapiros pre-existentes en los modelos con mayor espesor de silicona. El transporte pasivo del bloque superior, se pliega formando un anticlinal muy laxo (Fig. 4 B y D).La cantidad de desplazamiento contractivo, determina la geometría resultante del anticlinal, alcanzando su cota máxima (charnela del anticlinal) en el panel de la falla más verticalizado. La inversión de estos sinclinales de rampa, también se caracteriza por la presencia de estructuras contractivas de piel fina (despegadas en la silicona) que se desarrollan cuando el sinclinal se desplaza por encima de este panel intermedio, donde tiene lugar una disminución de la amplitud del pliegue y un acortamiento de las áreas plegadas involucradas.

La comparación entre la Cuenca de las Columbrets y los resultados experimentales muestran claramente que la estructura de esta cuenca es compatible con un sinclinal de rampa invertido que; 1) involucra un nivel de sal dúctil pre-cinemática; 2) se ha desarrollado encima de una falla de bajo ángulo que incluye, al menos, tres paneles, separados por un pliegue de falla superior convexo y uno inferior cóncavo.



FIGURA 4. Secciones longitudinales de los experimentos 3, 4, 5 y 6; (A) al final de 20 cm de extensión con 0.5cm de silicona, (B) después de 9 cm de inversión, (C) al final de 20 cm de extensión con 1 cm de silicona, y (D) después de 9 cm de inversión.

Las estructuras diapíricas están poco desarrolladas al noreste de la Cuenca de las Columbrets (Fig. 2). Aunque, hacia al suroeste estás se desarrollan en los dos márgenes de cuenca, indicando un aumento del espesor de la sal Triásica. En el Desert de les Palmes se desarrolla, coetáneamente a la Cuenca de las Columbrets, un sistema de fallas lístricas despegadas en la corteza superior, sin la presencia de sal Triásica. El desarrollo del semi-graben sería el equivalente a las estructuras observadas en el Desert de les Palmes (Fig. 2).

Los experimentos aportan también un modelo para explicar cómo se produce la inversión de estas cuencas sinclinales, si bien no contemplan la deformación del basamento.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha financiado con el proyecto SALTCRETES (CGL2014-54118-C2-1-R) y el "Grup de Recerca de Geodinàmica i Anàlisi de Conques" (2014SGR-467). El Laboratorio de Modelización Analógica GEOMODELS, es parte de un proyecto de infraestructura científica (UNAB08-4E-006) cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional del "Ministerio de Ciencia e Innovación" del gobierno español y por StatOil.

REFERENCIAS

Clark, J.A., Steward, S.A. y Cartwright, J.A.(1998): Evolution of the NW margin of the North Permian Basin, UK North Sea. *Geological Society of London*, 155(4): 663-676.

- Ferrer, O., McClay, K. y Sellier, N.C. (2016): Influence of fault geometries and mechanical anisotropies on the growth and inversion of hanging-wall synclinal basins: insights from sandbox models and natural examples. En: The Geometry and Growth of Normal Faults (C. Childs, R.E. Holdsworth, C.A.L. Jackson, T. Manzocchi, J.J. Walsh y G. Yielding eds.). *Geological Society* of London, Special Publications, 439:http://doi.org./10.1144/SP439.8.
- Roca, E., Guimerà, J. y Salas, R. (1994): Mesozoic extensional tectonics in the southeast Iberian Chain. *Geologycal Magazine*, 131(2): 155-168.
- Roca, E. (2001): The Northwest Mediterranean Basin (Valencia Trough, Gulf of Lions and Liguro-Provençal basins): structure and geodynamic evolution. En: Peri-Tethys Memoir 6: Peri-Tethyan Rift/Wrench basins and Passive Margins (P.A. Ziegler, W. Cavazza, A.H.F. Robertson y S. Crasquin-Soleaueds). *Mémoires du Muséum National d'Histoire Naturelle*, 186: 671-706.
- Soto, R., Casas-Sainz, M y Del Río, P. (2007): Geometry of half-grabens containing a mid level viscous décollement. *Basin Research*, 19: 437-450.
- Tankar, A.J. y Welsink, H.J.(1989): Mesozoic extension and styles of basin formation in Atlantic Canada. En: *Extensional tectonics and stratigraphy* of the North Artlantic margins (A.J. Tankard y Balkwill, H.R. eds.). AAPG Memoir, 46: 175-195.
- Weijermars, R.(1986): Flow behavior and physical chemistry of bouncing putties and related polymers in view of tectonic laboratory applications. *Tectonophysics*, 123: 325-358.
- Ziegler, P.A.(1988): Evolution of the Arctic-North Atlantic and the Western Tethys. *AAPG Memoir*, 43: 164-196.