

Modelación numérica de sedimentación subacuática sintectónica: efecto de la presencia de fallas normales y zonas de relevo en la distribución de sedimento.

Numerical modelling of syntectonic subaqueous sedimentation: the effect of normal faulting and a relay ramp on sediment dispersal.

O. Gratacós¹, A. Carmona¹, R. Clavera-Gispert¹, J.A. Muñoz¹ y S. Hardy¹

¹ Geomodels Research Institute, Departament de Dinàmica de la Terra i de l'Oceà, Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona, C/ Martí i Franquès s/n, 08028, Barcelona, ogratacos@ub.edu

Resumen: Las fallas normales y las zonas de relevo son comunes en contextos extensivos y juegan un papel importante en la distribución de sedimento. Este control está bien estudiado en condiciones subaéreas, pero no es así en condiciones subacuáticas, donde los estudios son escasos. En estos casos, la modelación numérica puede ser una buena herramienta para entender y complementar la sedimentación sintectónica. En esta contribución, se presenta un nuevo modelo numérico (que combina deformación tectónica con sedimentación clástica) para estudiar el relleno sedimentario en una cuenca extensiva y, concretamente, en la zona de relevo entre fallas normales. Para este caso, se han definido diferentes configuraciones variando tres parámetros: (1) estructura; (2) tasa de desplazamiento de las fallas; y (3) localización del área fuente. La comparación entre los diferentes experimentos permite concluir que, la configuración estructural condiciona la sedimentación de los diferentes tipos de sedimento creando asimetrías en la distribución de sedimentos. Aún así, los correspondientes cinturones de facies (sedimento mayoritario) no reflejan esa asimetría y, por lo tanto, la posición de las fallas en profundidad. Además, la dirección de transporte condiciona el patrón de distribución llegando a obtener arquitecturas de depósito complejas con aparentes terminaciones estratigráficas que pueden inducir a errores interpretativos (terminaciones aparentes de estratos) en áreas sin información litológica.

Palabras clave: Modelos numéricos, zonas de relevo, tectónica extensiva, transporte, sedimentación.

Abstract: *Relay ramps and transfer fault zones are common in extensional settings and play a significant role in sediment dispersal. Unlike for subaerial settings, the impact of subaqueous relay ramps on sediment dispersal is less studied. In these cases, numerical approximations could be a good approach to understand the syntectonic sedimentation. Considering this, a novel numerical model (which merges tectonic deformation and sedimentation) is used to study the sedimentary infill related to a two-overlapped extensional faults and the related transfer zone. To perform the test study, three main parameters were considered: (1) fault configuration; (2) fault displacement rates; and (3) source area location. Our results, allow us to conclude that, although the coarse and medium-grained sediments shows not only differences perpendicular to faults, but also differences parallel to faults (conditioned by the left stepped fault geometry). Although, the dominant grain-size trends are linear and parallel to faults without reflecting the fault configuration. Furthermore, the relationship between the relay ramp dip and the sediment transport direction, strongly influences the grain-size arrangement. Complex stratigraphic architecture could be obtained with apparent stratigraphic beds terminations and erroneous conclusions could be deduced in those cases where lithological information is poor or inexistent.*

Key words: *Numerical modeling, relay ramps, extensional tectonics, transport, sedimentation.*

INTRODUCCIÓN

Las zonas de relevo (Fossen y Rotevatn, 2016) son comunes en un contexto extensivo y juegan un papel importante en el desarrollo de las cuencas de *rift* y en la dispersión del sedimento debido a su control sobre las direcciones de transporte. Como consecuencia, y también ligado a otros factores (como variaciones del nivel del mar o el aporte de sedimento) ejercen un fuerte control en la posición y geometría de los cuerpos y canales de arena y/o grava (Gawthorpe y Colella 1990, Gawthorpe y Hurts, 1993).

Diferentes autores han analizado estos sistemas a partir del estudio del relleno sintectónico en el registro sedimentario para entender y extraer la evolución del sistema de fallas y su relación con los patrones de distribución (por ejemplo, Hemelsdaël y Ford, 2014). También se han propuesto aproximaciones a través de modelos numéricos, ya sea 2D como 3D, aunque centrados en la modelación de los procesos subaéreos, como el desarrollo y control de la red de drenaje y la evolución del relieve (Cowie et al. 2006); o centrados en el estudio del área fuente y la cantidad de sedimento aportado; o en la arquitectura de depósito ligada a la deformación en el margen de un *semi-graben* (Gawthorpe et al. 2003). Se puede consultar una

revisión del efecto de las zonas de relevo en las direcciones de transporte y sedimentación en Athmer y Luthi (2011). Aún así, pocos estudios se han centrado en el efecto de este tipo de estructuras en medios subacuáticos y como las fallas extensivas y las zonas de relevo controlan la geometría del nivel de base y, en consecuencia, el flujo de fluido y la dispersión del sedimento que se transporta en suspensión.

Teniendo en cuenta esto, el principal objetivo de esta contribución es analizar, bajo estas condiciones, los patrones de transporte y sedimentación de tres sedimentos clásticos diferentes en una cuenca extensiva relacionada con dos fallas normales y una zona de relevo. Este estudio se realiza aplicando un programa informático que combina un modelo de deformación y uno de sedimentación subacuática (Carmona et al., 2010) que nos permite, no sólo reproducir la evolución de los diferentes cuerpos sedimentarios, si no también la distribución de facies y la deformación en la unidad pretectónica.

La variación de diferentes parámetros (estructura, teniendo en cuenta una o dos fallas; tasas de movimiento de las fallas; y posición del área fuente) permite tener un control sobre qué parámetro de los anteriores es el determinante y como éste afecta a la arquitectura de depósito y distribución de facies final, para, de este modo, ser capaces de cuantificar y predecir geometrías y/o distribuciones, de esas unidades o facies que puedan ser de interés.

EL MODELO NUMÉRICO

El programa informático desarrollado y usado en este estudio (Carmona et al., 2010) es un nuevo código que combina dos modelos anteriores: un modelo de deformación de elementos discretos (denominado DEM) (Finch et al., 2004) y un modelo de transporte y sedimentación subacuática basado en procesos (denominado SMF) (Gratacós et al., 2009). La combinación de ambos modelos, proporciona una evolución más completa y compleja, donde la deformación de la unidad pretectónica condiciona la sedimentación sintectónica, y la deposición de esta unidad sintectónica, a su vez, condiciona la posterior deformación de la unidad pretectónica.

La superficie topográfica inicial, definida por el programa DEM, es utilizada por SMF como nivel de base de la cuenca donde se calculan los procesos de transporte y sedimentación. Cada cierto tiempo de cálculo (establecido para asegurar un resultado matemáticamente correcto), esta nueva superficie se actualiza según la deformación y la sedimentación calculada por DEM y SFM respectivamente. En función de los resultados, se añaden nuevos elementos discretos a DEM y se actualiza la unidad sintectónica en SFM para el siguiente paso de tiempo.

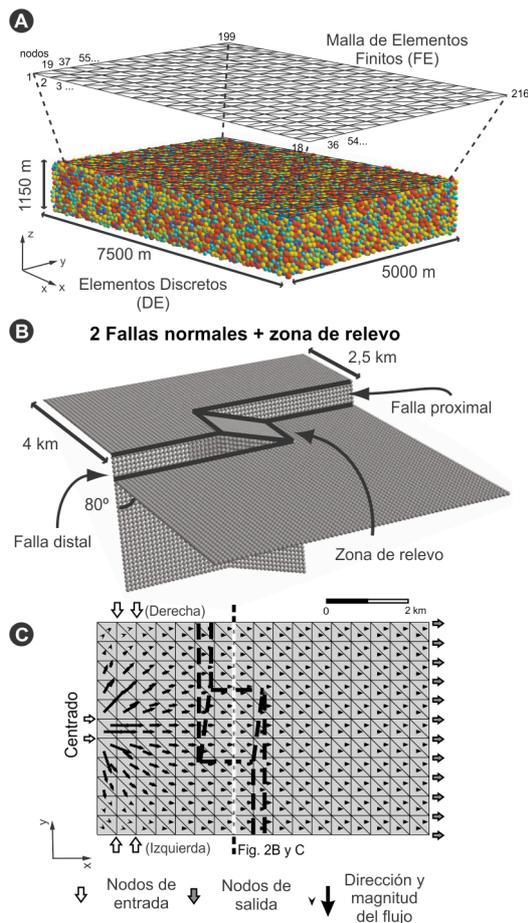


FIGURA 1. A. Configuración inicial para la malla de elementos discretos y la malla de elementos finitos. B. Condiciones de contorno para el tercer experimento donde se definen dos fallas normales y una zona de relevo. C. Experimento 3 definiendo una área fuente puntual y centrada, con el flujo de fluido resultante representado. También se representa la teórica posición de la entrada puntual definida a la izquierda o a la derecha para los respectivos experimentos, así como la posición de los cortes de la figura 2B y C.

CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL

La configuración inicial (Fig. 1) utilizada para la unidad pretectónica y definida en DEM tiene unas dimensiones de 7,5 x 5 x 1,5 km, donde se definen 45.210 esferas de un radio entre 35 y 60 m. La malla de elementos finitos definida para SFM que se adapta a esta unidad pretectónica, tiene 374 elementos triangulares (con 216 nodos) (Fig. 1A), y presenta una profundidad de agua inicial de 100 m y sin oscilaciones del nivel del mar, por lo tanto, los posibles cambios batimétricos responden a procesos de deformación y sedimentación. Para el sedimento que entra en la cuenca, se definen tres granulometrías diferentes (fino, medio y grueso). Los valores de entrada de los tres tipos de sedimento y, el caudal de agua entrante ($12 \text{ m}^3/\text{s}$) se mantiene constante en todos los experimentos para poder comparar los resultados. El tiempo total simulado es de 6000 años, que se dividen en 60 pasos de tiempo de 100 años cada uno.

Para estudiar el efecto que producen diferentes configuraciones estructurales en el transporte y sedimentación subacuática, se han tenido en cuenta tres

parámetros principales (estructura, tasa de movimiento y posición del área fuente), que se han ido variando según el ejemplo, y siempre yendo del más sencillo al más complejo. Se han tenido en cuenta tres modelos estructurales diferentes: falla única proximal, falla única distal y dos fallas con zona de relevo (véase Fig. 1B). A cada configuración estructural se le han aplicado tres tasas de desplazamiento diferentes (2, 5 y 10 cm/año) lo que supone un total de 9 experimentos. Si a estos experimentos se les aplican 4 posiciones diferentes del área fuente (regional, puntual izquierda, puntual derecha y puntual central, véanse estas tres últimas configuraciones en la Fig. 1C), hacen un total de 32 experimentos.

RESULTADOS

Teniendo en cuenta que se han realizado estos 32 experimentos diferentes, a continuación se detallan aquellos que proporcionan información relevante y mas completa para entender el sistema geológico bajo estudio.

En lo referente a la deformación de la unidad pretectónica, en todos los experimentos se obtiene una geometría acorde con un modelo cinemático de *trishear* relacionado con un pliegue de propagación de falla (Erslev, 1991).

Para el sedimento sintectónico, y según la variación de la tasa de desplazamiento de las fallas, se obtienen menores distancias de transporte y un registro geológico más completo para un valor de tasa de desplazamiento de 10 cm/año (Fig. 2A).

Según la configuración estructural, el patrón de sedimentación obtenido para el tercer experimento con dos fallas normales y una zona de relevo, no es la combinación de los dos más sencillos (una falla proximal o distal). En este sentido, no se observa una zona de transición oblicua en la zona de relevo que enlace las dos fallas normales. Por contra, se observan distribuciones de facies (definidas a partir del sedimento mayoritario en cada punto de la cuenca) lineales o paralelas a las fallas, sin reflejar la geometría real de las fallas y la zona de relevo en planta. Aún así, la sedimentación del sedimento más grueso (y el medio), sí que muestra diferencias tanto distales como laterales, lo que indica una clara influencia en su distribución de las dos fallas y la zona de relevo.

En relación a la posición del área fuente, se puede observar como la ausencia de linealidad de los cinturones de facies y la distribución del sedimento, no está condicionada por la geometría de las fallas y la zona de relevo, si no por la posición del área fuente, siendo máximo este control, cuando la entrada se produce en los laterales (paralela a la dirección de las fallas) (Fig. 2B y C). En estos casos, y según la relación entre la dirección de transporte y el buzamiento de la zona de relevo, se puede llegar a obtener una arquitectura de depósito compleja con terminaciones de estratos aparentes que pueden inducir a conclusiones erróneas en aquellos casos donde la

información geológica es escasa (por ejemplo, un perfil sísmico) (Fig. 2C).

CONCLUSIONES

El modelo numérico desarrollado (que combina procesos de deformación y procesos sedimentarios) se presenta como una buena herramienta para analizar el efecto y control que ejerce la presencia de fallas normales subacuáticas (y zonas de relevo asociadas) sobre la distribución del sedimento y la arquitectura de depósito resultante. En este caso, se ha analizado la influencia de tres parámetros diferentes: (1) estructura, (2) tasas de desplazamiento y (3) posición del área fuente. Aunque todos ellos ejercen su influencia en la distribución final del sedimento, el parámetro que se deduce que es más determinante, teniendo en cuenta una configuración estructural con dos fallas normales y una zona de relevo, es la posición del área fuente.

Además del análisis y cuantificación de los propios resultados y de las conclusiones directas que se puedan derivar, la aplicación del modelo numérico, también puede proporcionar nuevas ideas, relaciones o conceptos que ayuden a complementar los estudios ya existentes y poder llegar a ser predictivos.

AGRADECIMIENTOS

La realización de esta investigación se inscribe en el proyecto SALTECRES (CGL2014-54118-C2-1-R) así como en el Grup de Recerca Consolidada de Geodinàmica i Anàlisi de Conques (2014SGR467).

REFERENCIAS

- Athmer W. y Luthi S. M. (2011): The effect of relay ramps on sediment routes and deposition: A review. *Sedimentary Geology*, 242, 1-17
- Carmona A., Clavera-Gispert R., Gratacós O. y Hardy S. (2010): Modelling syntectonic sedimentation: combining a discrete element model of tectonic deformation and a process-based sedimentary model in 3D. *Mathematical Geoscience*, 42, 519-534
- Cowie P.A., Tucker G.E., Whittaker A.C., Naylor M., Ganas A. y Roberts G. P. (2006): Investigating the surface process response to fault interaction and linkage using a numerical modelling approach. *Basin Research*, 18, 231-266.
- Erslev E. A. (1991). Trishear fault-propagation folding. *Geology*, 19(6), 617-620.
- Finch E., Hardy S. y Gawthorpe R. (2004): Discrete element modelling of extensional faults propagation folding above rigid basement rocks. *Basin Research*, 16, 489-506
- Fossen, H. y Rotevatn, A. (2016): Fault linkage and relay structures in extensional settings – a review. *Earth Science Reviews*, 154, 14-28.
- Gawthorpe R.L. y Colella A. (1990): Tectonics controls on coarse-grained delta depositional

systems in rift basins. *The International Association of Sedimentologists*, Especial Publication 10, 113-127.

Gawthorpe R.L. y Hurst J.M. (1993): Transfer zones in extensional basins: their structural style and influence on drainage development and stratigraphy. *Journal of the Geological Society, London*, 150, 1137-1152.

Gawthorpe R.L., Hardy S. y Ritchie B. (2003): Numerical modelling of depositional sequences in half-graben rift basin. *Sedimentology*, 50, 169-185.

Gratacós O., Bitzer K., Cabrera L. y Roca E. (2009): SIMSAFADIM-CLASTIC: a new approach to

mathematical 3D forward simulation modelling for clastic and carbonate sedimentation. *Geologica Acta*, 7, 311-322.

Hemelsdaël R. y Ford M. (2014): Relay zone evolution: a history of repeated fault propagation and linkage, central Corinth rift, Greece. *Basin Research*, 1-23, doi: 10.1111/bre.12101

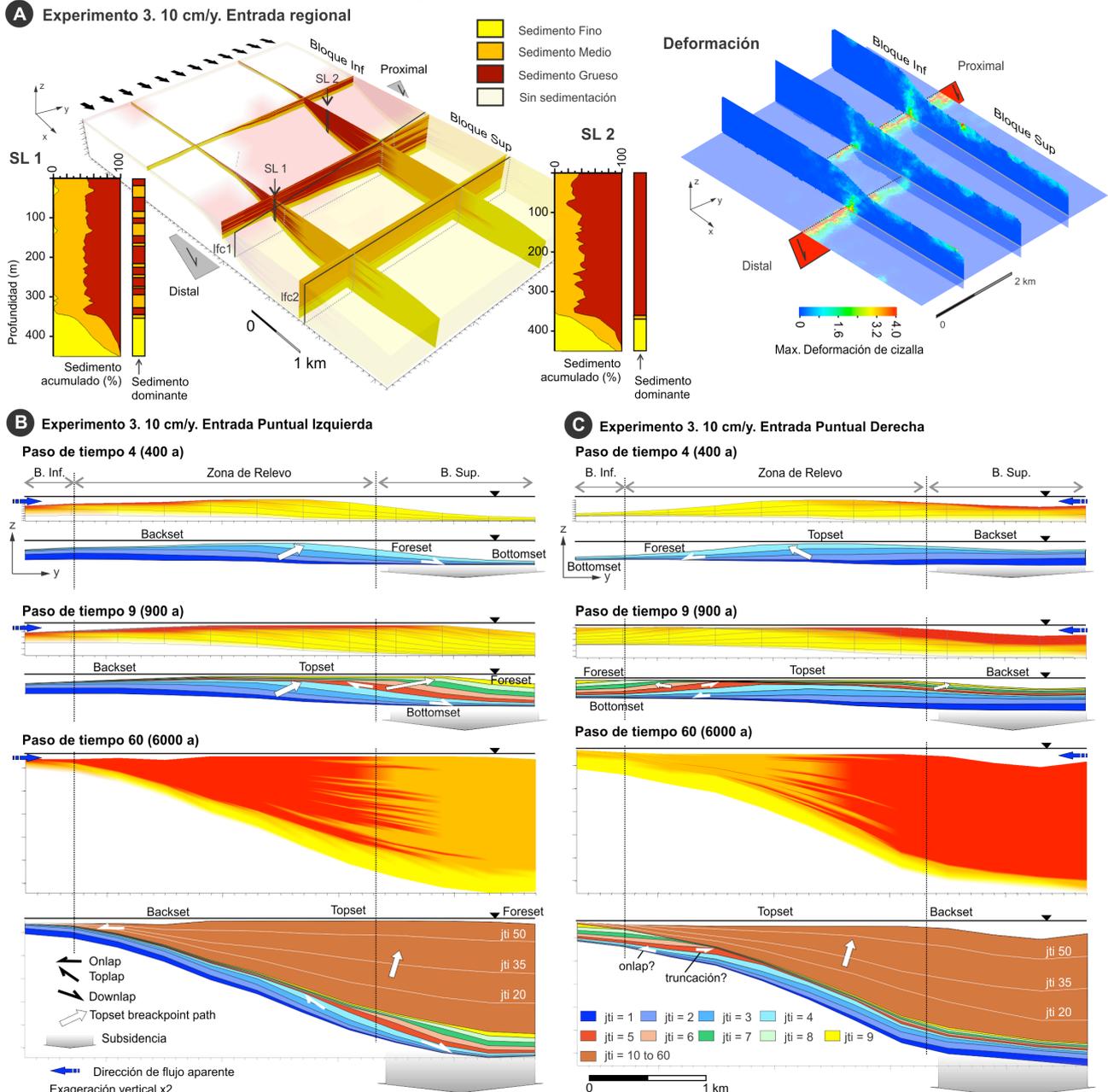


FIGURA 2. A. Resultados para la sedimentación sintectónica y la deformación de la unidad pretectónica en el tercer experimento considerando dos fallas normales y una zona de relevo. B. Sección a lo largo de la zona de relevo (paralela a la dirección de las fallas normales, ver situación en la Figura 1C) para el tercer experimento considerando una área fuente puntual y situada en la izquierda (obteniendo una dirección de transporte acorde con la dirección de buzamiento de la zona de relevo). Se han representado 3 pasos de tiempo diferentes. C. El mismo ejemplo anterior, pero situando el área fuente en la derecha (transporte resultante contrario a la dirección de buzamiento de la zona de relevo). Véase como en este experimento se pueden observar estratos con terminaciones aparentes que pueden inducir a conclusiones erróneas.