

# Modelización experimental de la dinámica de la red de drenaje fluvial en cuñas de cabalgamientos

## *Experimental modeling of river network dynamics in thrust wedges*

M. Viaplana<sup>1</sup>, J. Babault<sup>1</sup>, J. Van Den Driessche<sup>2</sup>, S. Dominguez<sup>3</sup> y A. Teixell<sup>1</sup>

1. Dpto. de Geología Universitat Autònoma de Barcelona 08193 Bellaterra (Barcelona) Marc.Viaplana@uab.cat; Julien.Babault@uab.cat
2. Géosciences Rennes Université de Rennes 1 35042 Rennes (Francia) jean.van-den-driessche@univ-rennes1.fr
3. Géosciences Montpellier Université Montpellier II 34095 Montpellier (Francia) stephane.dominguez@gm.univ-montp2.fr

**Resumen:** Mediante un novedoso sistema de modelización experimental que incluye un sistema de lluvia en una caja de arena, se está llevando a cabo un estudio sobre la interacción entre la tectónica y la red de drenaje en una cuña de cabalgamientos activa. Durante el desarrollo de una cuña orogénica natural, las estructuras compresivas ensanchan el orógeno y elevan sus pendientes. La red de drenaje se reajusta a los cambios generados por la deformación, adaptándose a los cambios de pendiente y a las estructuras emergentes. Como consecuencia, la red de drenaje tiene una dinámica que resulta de la competencia entre la tectónica y el poder erosivo de los ríos. Tras el estudio de los modelos realizados proponemos un proceso por el cual los tramos longitudinales formados en las partes externas de la cuña orogénica pueden migrar hacia las partes internas debido al efecto del “underthrusting”. Los desvíos y las posteriores capturas de los cauces longitudinales causan cambios de pendientes locales y de tasas de erosión, afectando, al flujo de sedimentos y la localización de los cuerpos clásticos en la cuenca de antepaís.

**Palabras clave:** Cabalgamientos, drenaje fluvial, erosión, capturas, modelización experimental.

**Abstract:** *In this study we present the interactions between tectonics and drainage network in a deforming accretionary wedges using a novel experimental modeling. This experimental modeling is composed of a deformational device (sand-box type), a rainfall system. During the evolution of a natural orogenic wedge, development of compressive structures expand the orogen and steep slopes. As a consequence, the drainage network adapts to these changes. This dynamic is controlled by the competition between tectonics and the rivers erosive power. We propose the underthrusting effect as the process which explains the existence of longitudinal valleys in the internal orogenic zone. Captures of longitudinal rivers produce changes in the local slope and in the erosion rates; it should affect the sedimentary inflows as well as the localization of clastic bodies on the foreland basin.*

**Key words:** *Thrust faults, fluvial drainage, erosion, captures, experimental modeling.*

## INTRODUCCIÓN

El agua en la superficie de la Tierra fluye a favor de la máxima pendiente por el efecto de la gravedad. Es de esperar entonces, que los ríos fluyan siguiendo la pendiente regional, y que el drenaje sea transversal. Hovius (1996) muestra que en la mayoría de orógenos activos la red de drenaje es transversal. Sin embargo, en las zonas externas del orógeno las estructuras compresivas emergentes (pliegues y cabalgamientos) pueden desviar los ríos, generando tramos longitudinales (Van der Beek et al., 2002). El desvío de un río depende de su capacidad erosiva, de la agradación de sedimentos por detrás de la estructura emergente, del estilo de deformación y de la tasa de

levantamiento de la estructura. Buenos ejemplos del desvío de la red de drenaje por las estructuras tectónicas se hallan en la cordillera del Zagros, donde se observa un drenaje predominantemente longitudinal (e.g. Ramsey et al., 2008).

La formación de un prisma orogénico implica la acomodación del acortamiento en sucesivas unidades cabalgantes aumentando la pendiente regional de la superficie. Puesto que la erosión en cada punto es proporcional a la erosionabilidad del material, al flujo de agua y a la pendiente (e.g. Howard, 1994) cabe esperar que los ríos transversales ganen poder erosivo a medida que la deformación progresa. Una consecuencia del aumento del poder erosivo de los ríos transversales situados en las vertientes externas de los sistemas

compresivos es que estos ríos puedan capturar las cabeceras de los tramos longitudinales originalmente desviados por esas mismas estructuras en los estadios iniciales de crecimiento. Este tipo de reorganización de la red de drenaje fluvial se observa en cordilleras como el Atlas de Marruecos (Babault et al., 2007). Este caso natural sugiere que una red de drenaje dominada por ríos longitudinales representa un estadio transitorio en la evolución de los orógenos y podría ser la razón de la sistemática presencia de ríos transversales en la mayoría de los orógenos activos (Hovius, 1996). Para comprender la dinámica de la red de drenaje en una cuña orogénica y los factores que la controlan se han realizado experimentos que modelan los procesos tectónicos de acreción y a la vez, los procesos de erosión por escorrentía, transporte, y sedimentación. Con el análisis de estos modelos mostramos que:

-Cuando un río longitudinal paralelo a las estructuras se forma, se incorpora al prisma y posteriormente puede ser capturado por ríos transversales a medida que la pendiente aumenta.

-El proceso de captura implica un aumento de área de drenaje para el río capturador y, a la vez, una pérdida de área de drenaje para el río capturado.

-Estas variaciones afectan a los aportes clásticos en las desembocaduras situadas en las zonas de sedimentación, modificando las tasas de acumulación y controlando la localización de los cuerpos clásticos proximales.

## METODOLOGÍA

Se han realizado modelos análogos que abarcan procesos tectónicos de acreción, de erosión por escorrentía, de transporte y sedimentación en cuñas de cabalgamientos experimentales. El material utilizado es una mezcla de polvo de sílice, PVC y microesferas de cristal que rellena una mesa de deformación con una base móvil que comprime hacia un borde fijo el material sometido a una lluvia fina. Un interferómetro láser obtiene modelos de elevación digital, en diferentes momentos de los experimentos, permitiendo estudiar cuantitativamente la superficie sometida a erosión de los prismas modelizados. El escalado espacial de los modelos es de 1 cm /500 m (Graveleau, 2008).

### Análisis de las pendientes de los ríos

A partir de las topografías digitales, se han analizado los canales experimentales utilizando una ecuación que describe los perfiles longitudinales de los ríos (Whipple y Tucker 1999). La extracción de los índices de pendiente normalizados a la concavidad ( $K_{sn}$ ) permite comparar las pendientes de los canales entre ellos. La relación entre los  $K_{sn}$  y las tasas de incisión no están calibrados para los experimentos. Sin

embargo, la erosión es proporcional al flujo de agua y a las pendientes (Howard, 1994). Entonces, los  $K_{sn}$  altos deberían indicar tasas de erosión relativamente altas respecto a tramos de canales con  $K_{sn}$  bajos.

## Modelos

Se realizaron tres modelos, con igual tasa de lluvia y acortamiento total, cambiando la tasa de acortamiento y/o los espesores del material. Todos los modelos tienen una capa basal de microesferas de cristal que ejerce de nivel de despegue. Se ha modificado un solo parámetro de un experimento a otro (Tabla I).

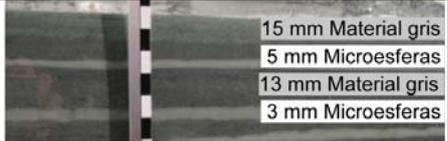
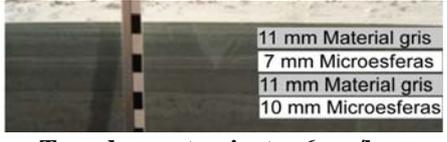
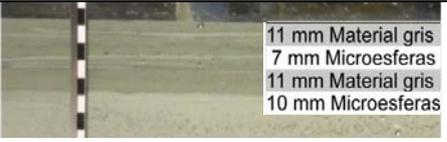
<b>MODELO 1</b>	 <p><b>Tasa de acortamiento: 6 cm/hora</b></p>
<b>MODELO 2</b>	 <p><b>Tasa de acortamiento: 6 cm/hora</b></p>
<b>MODELO 3</b>	 <p><b>Tasa de acortamiento: 15 cm/hora</b></p>

TABLA I. Tabla mostrando los espesores iniciales de material y las tasas de acortamiento para cada modelo.

## RESULTADOS

### Desarrollo estructural y drenaje

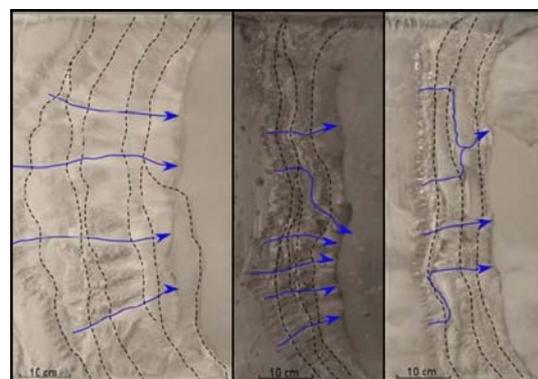


FIGURA 1. Organización de la red de drenaje en planta de los modelos 1, 2 y 3 respectivamente. En línea discontinua se indica la traza de las estructuras principales, que tienen una vergencia hacia la derecha. Las fotografías se tomaron a la mitad de la duración total del experimento ( $t = 4h15min$ ,  $t = 4h$  y  $t = 1h20min$  para los modelos 1, 2 y 3 respectivamente).

En el modelo 1 se crean estructuras compresivas (Fig. 1) cada 5 cm. El acortamiento total (49 cm) ha sido distribuido sobre una gran cantidad de estructuras (8 al final del experimento). Como consecuencia, las tasas de levantamiento asociadas a cada estructura han sido bajas ( $< 2$  cm/h). Este estilo de deformación ha sido inducido por una fricción basal más alta que en los demás modelos. El drenaje se ha desarrollado completamente transversal, ya desde el principio del experimento. El espaciado entre canales no varía prácticamente. Las unidades tectónicas no provocan desvíos de los canales.

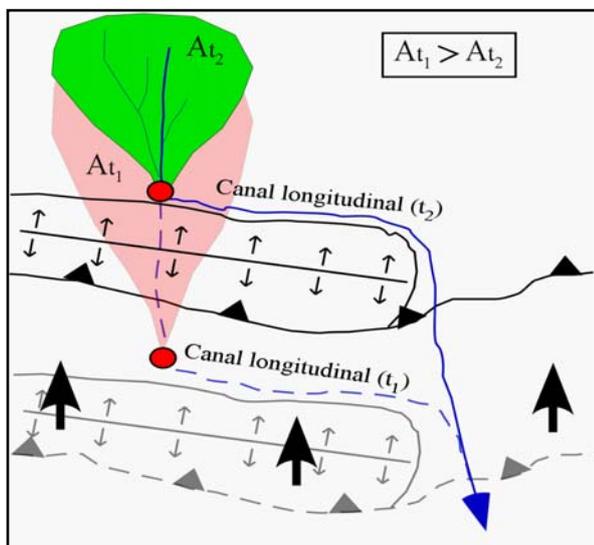


FIGURA 2. Esquema que muestra la pérdida de área de drenaje para un tramo longitudinal, debido a la migración de una estructura hacia el interior del prisma. Las flechas negras de la parte inferior simbolizan la dirección de la migración. La línea discontinua azul indica el canal longitudinal en el momento en que se forma  $t_1$ , en azul se ha indicado el canal longitudinal que ha migrado con la estructura.

En el modelo 2 se crean estructuras compresivas más espaciadas, cada 8 cm. El acortamiento total (43 cm) ha sido distribuido sobre menos estructuras (4 al final del experimento). Como consecuencia, las tasas de levantamiento asociadas a cada estructura han sido mayores respecto al modelo 1. La fricción basal en este modelo era menor que en el modelo anterior. El drenaje se caracteriza por desarrollar una red principalmente transversal pero puntualmente se generan estructuras capaces de desviar los canales que pasan de transversales a longitudinales. Por procesos de captura y también de erosión lateral, el drenaje siempre vuelve a ser transversal a medida que continúa el desarrollo del prisma.

Desde el inicio del modelo 3, la red de drenaje es longitudinal generada por las estructuras cabalgantes. Las estructuras compresivas se crean cada 8 cm. El

acortamiento total (42 cm) ha sido distribuido sobre 4 estructuras compresivas. La tasa de levantamiento para cada estructura es mayor que para los modelos anteriores ya que la tasa de acortamiento es mayor (15 cm/hora). La fricción basal es más baja que en el modelo 1 e igual a la del modelo 2.

### Pérdida de área por “underthrusting”

Debido a la acumulación de acortamiento los tramos desviados por las estructuras (tramos longitudinales) se ven afectados por una migración pasiva, desde las zonas externas hacia el interior del prisma (ver Fig. 2). En el modelo 2, esta migración implica una pérdida del área de drenaje del canal longitudinal del 23%.

### Organización de la red de drenaje

En el modelo 2 (Fig. 3A) se observa la formación de un tramo longitudinal, debido al relieve formado por una estructura cabalgante a  $t = 290$  min. A medida que avanza la deformación se incrementan las pendientes del flanco externo de la estructura emergente, donde se forman pequeños canales incipientes que crecen por erosión remontante. La erosión remontante acaba capturando el canal longitudinal a  $t = 400$  min (Fig. 3B). En figura 3 se observa como el canal longitudinal a  $t = 350$  min tiene valores de  $K_{sn}$  bajos (colores verdes), mientras el canal transversal en el borde externo de la estructura emergente tiene valores más elevados. Una vez capturado el tramo final tiene valores de  $K_{sn}$  aún más altos (pasa de verde a anaranjado).

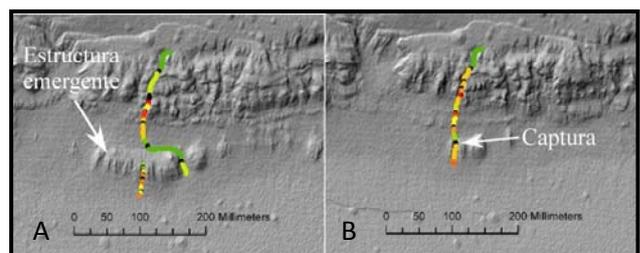


FIGURA 3. Modelos de elevación digital del modelo 2. Se muestran los valores de  $K_{sn}$  del canal longitudinal antes (A) y después de ser capturado (B), a  $t = 350$  min y  $t = 400$  min, respectivamente.

## DISCUSIÓN

### Efectos de los factores externos e intrínsecos de la dinámica de la red de drenaje

La comparación entre los modelos 1, 2 y 3 muestra que las altas tasas de levantamiento sobre las estructuras compresivas (modelos 2 y 3) permiten el desvío de los canales. Las tasas de levantamiento bajas

en el modelo 1 impiden que las estructuras desvíen los canales.

El modelo 2 demuestra que el tramo longitudinal pierde área de drenaje a medida que avanza la deformación (23%). En el mismo tiempo, el crecimiento del prisma induce un aumento de las pendientes en los canales transversales. Sin embargo, los tramos longitudinales no se ven afectados por este aumento de las pendientes. Esto se refleja en la captura de un longitudinal por un transversal (Fig. 3).

En el modelo 3 no se han observado capturas. La única diferencia entre los modelos 1 y 2 es la proporción más elevada entre la tasa de acortamiento y la tasa de lluvia. Por lo tanto, la única explicación a la ausencia de capturas es la baja tasa de lluvia que provoca bajas tasas de erosión en los canales transversales.

La comparación de los modelos 1, 2 y 3 muestra que variando la fricción basal y/o los espesores de las unidades cabalgantes (es decir, las propiedades mecánicas de los experimentos) el estilo de deformación puede hacer variar la red desde un drenaje transversal (modelo 1) a un drenaje dominado por tramos longitudinales (modelo 3). Ese resultado confirma resultados obtenidos en modelización numérica (e.g., Van der Beek et al. 2002) y interpretaciones de casos naturales (e.g., Ramsey et al 2008).

De la comparación entre los modelos 2 y 3, observamos que una captura, un proceso intrínseco al sistema tectónico en erosión, depende también de factores externos a través de la proporción entre la tasa de acortamiento y la tasa de lluvia.

## CONCLUSIONES

La modelización analógica muestra que durante la construcción de un prisma se pueden incorporar tramos longitudinales perpendiculares a la pendiente topográfica regional. Los prismas experimentales de mayor fricción basal presentan estructuras muy juntas con baja tasa de levantamiento que son fácilmente atravesadas por ríos transversales, pero los prismas de menor fricción basal presentan estructuras más espaciadas y con mayor tasa de crecimiento individual que favorecen el desvío de los ríos hacia orientaciones longitudinales. Las cabeceras de esos tramos longitudinales pueden ser capturadas por canales transversales que crecen en el flanco externo del prisma

por el aumento de la pendiente topográfica, a medida que la cuña progresa aumentando su relieve estructural y su pendiente media.

Una captura aumenta el área de drenaje del canal que captura y disminuye la del canal capturado. Sugerimos que los procesos de captura en los casos naturales deben modificar las tasas de transferencia de sedimentos, así como la localización de los cuerpos clásticos proximales, teniendo una importancia capital para la comprensión de las relaciones *source-to-sink* en cuencas sedimentarias.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha financiado con los proyectos CGL2010-15416, Consolider-Ingenio CDS2006-00041 (TopoIberia).

## REFERENCIAS

- Babault, J., Van Den Driessche, A., Crave, A. y Teixell, A. (2007): *High Atlas morphology: insight from the drainage pattern*. III Workshop of the ILP Task force on Sedimentary Basins, Marrakech.
- Graveleau, F. (2008): *Interactions Tectonique, Erosion, Sédimentation dans les avat-pays de chaînes: Modelisation analogique et étude des piémonts de l'est du Tien Shan (Asie centrale)*. Tesis Doctoral Univ. de Montpellier, 486 p.
- Hovius, N. (1996): *Regular spacing of drainage outlets from linear mountain belts*. *Basin Research*, 8: 29-44.
- Howard, A.D. (1994): *A detachment-limited model of drainage basin evolution*. *Water Resources Research*, 30: 2261-2285.
- Ramsey, L.A., Walker, R.T. y Jackson, J. (2008): *Fold evolution and drainage development in the Zagros Mountains of Fars Province, SE Iran*. *Basin Research*, 20: 23-48.
- Van der Beek, P.A., Champel, B. y Mugnier, J.L. (2002): *Control of detachment dip on drainage development in regions of active fault propagation folding*. *Geology*, 30: 471-474.
- Whipple, K.X. y Tucker, G.E. (1999): *Dynamics of the stream power river incision model :Implications for height limits of mountain ranges, landscape response timescales and research needs*. *Journal of Geophysical Research*, 104, 17661-17674.