

## COMO SE FORMAN LAS MONTAÑAS: ENSEÑANZAS DEL LABORATORIO

### *How do the mountains form: teaching from Laboratory*

Ana Crespo-Blanc y María Luján (\*)

#### RESUMEN

*Cuando se forman las cadenas de montañas, las rocas se deforman. Grandes láminas compuestas por capas inicialmente horizontales cabalgan unas encima de las otras. Este proceso tiene lugar a lo largo de varios millones de años, pero es posible simularlo en Laboratorio. Se puede reproducir en algunos segundos la formación de estructuras geológicas muy semejantes a las que se observan hoy día en casos naturales. El objetivo de este taller, de carácter experimental, consiste en divulgar algunos aspectos del desarrollo de cadenas de montañas, con un modelo muy sencillo de ejecutar, a base de arena. A pequeña escala, muestra como las montañas han podido formarse por compresión y acortamiento de capas horizontales.*

#### ABSTRACT

*When the mountain belt forms, the rocks deform. Great slices are composed of initially horizontal layers and they are thrust one over each other. This process took place over a few millions years, but it is possible to model it in a laboratory. In a few seconds, the growth of geological structures (very similar to those observed nowadays in natural cases) can be simulated. The aim of this workshop, of experimental character, consists of spreading some aspects of the mountain belt development. A small-scale model constituted by sand, that permit us to show how the mountains can result from compression and shortening of the horizontal layers.*

**Palabras claves:** Cadenas de montañas, cabalgamiento, simulación, arena.

**Keywords:** Mountain belts, thrust, modelling, sand.

#### ¿PORQUÉ UN TALLER EXPERIMENTAL DE GEOLOGÍA?

¿Quién no se ha preguntado como las rocas que se observan hoy día en superficie y que tienen fósiles, testigos de su depósito y posterior solidificación en el fondo del mar, han llegado a formar montañas?

Este taller, de carácter experimental, intenta abordar esta cuestión con un modelo a pequeña escala, que permite reproducir algunos de los fenómenos geológicos que se observan a una escala mayor, como puede ser la formación de una cadena de montañas durante una convergencia. En estas cadenas, la observación de las rocas en el campo ayuda al geólogo a describir las estructuras geológicas que resultan de la deformación. En particular, es muy común observar grandes láminas de rocas superpuestas las unas a las otras, a través de superficies llamadas fallas inversas de bajo ángulo, o cabalgamientos, que producen un acortamiento de las capas.

Por supuesto, la imagen de una cadena de mon-

tañas que pueda tener cualquier observador, del simple excursionista al geólogo más sabio pasando por cualquier alumno de Enseñanzas Secundarias, no deja de ser una imagen fija dentro de la película del desarrollo de las montañas, película que dura varios millones de años. Este aspecto suele ser un problema a la hora de enseñar la Geología: ¿Como convencer a un estudiante que las rocas que forman las montañas son tan frágiles o dúctiles que se pueden deformar como la arena o la plastilina? ¿Como reducir el tiempo para observar “en directo” la formación de las estructuras que conforman la geología?

En general, se explica el desarrollo progresivo de las estructuras geológicas más sencillas que se pueda observar, una falla o un pliegue, con secuencias de dibujos, o en el mejor de los casos con dibujos animados, pero no deja de ser una aproximación muy artificial. En este taller, se propone utilizar la experimentación como método para las enseñanzas geológicas. Se presenta un modelo, muy didáctico y de fácil realización, que pretende cambiar la escala, temporal y dimensional, y reproducir la formación

(\*) Dto de Geodinámica-IACT; Universidad de Granada-CSIC; Facultad de Ciencias, Fuentenueva s/n, 18071 Granada. E-mail: [acrespo@ugr.es](mailto:acrespo@ugr.es) y [mlujan@ugr.es](mailto:mlujan@ugr.es).



de cabalgamientos asociados a pliegues. Así, se pasa de la imagen fija que se observa en la naturaleza y en los mapas geológicos, a la película de la evolución de una estructura desde su origen. Además, permite acercar al estudiante a unas técnicas de laboratorio que se utilizan en la investigación básica.

En primer lugar se describe el método experimental y; en segundo lugar, el desarrollo progresivo del experimento. Finalmente, se compara el resultado del experimento con un caso natural de la geología española (Sierra de Alcaraz, en la Cordillera Bética). Ambas situaciones muestran una gran similitud.

## MÉTODO EXPERIMENTAL

El experimento consiste en someter a compresión un paralelepípedo de arena, compuesto por capas inicialmente horizontales y de distintos colores, que va a simular, por ejemplo, las capas de una secuencia de calizas. Se construye el paralelepípedo de arena sobre una mesa de trabajo sobre la cual se coloca una lámina de papel vegetal indeformable. Esta lámina puede deslizarse por debajo de una tabla vertical fija que limita el paquete de arena, y que impide el paso del mismo. Así, a medida que se tire de la lámina de papel vegetal indeformable, el paralelepípedo inicial ira chocando contra la tabla vertical fija, y por lo tanto se ira comprimiendo. El montaje de la mesa de experimentación permite observar, a través de los vidrios laterales, la deformación progresiva del paralelepípedo inicial y la formación de cabalgamientos y estructuras asociadas.

Los fundamentos físicos que soportan esta experimentación, y las razones por las que se puede utilizar los materiales que se proponen en este taller se pueden encontrar en Liu et al. (1991) entre otros. Un resumen de los trabajos más importantes en relación con estos modelos figura en la página web del Laboratorio de Modelizaciones análogicas del Departamento de Geodinámica de la Universidad de Granada (Crespo-Blanc, 2002). Cabe destacar que en esta página se pueden encontrar además numerosas animaciones que reproducen diversas situaciones geológicas, con sus explicaciones correspondientes, aunque en estos momentos con un nivel adecuado a la Enseñanza universitaria.

### Construcción de la mesa de experimentación

El esquema de la mesa de experimentación, así como una foto de la misma antes de construir el paralelepípedo de arena se muestra en la figura 1. La lista completa del material necesario así como las dimensiones, los costes aproximados (enero 2004) y donde se pueden conseguir, figuran en el Apéndice. Consiste básicamente en una tabla de madera vertical fijada en un extremo de la mesa de experimentación, contra la cual se va a ir comprimiendo la arena, y dos vidrios laterales, a través de los cuales se van a observar los efectos de esta compresión. Se aconseja montar la mesa de experimentación sobre una mesa en el centro de una sala, de manera a que las dos caras de los vidrios sean observables.

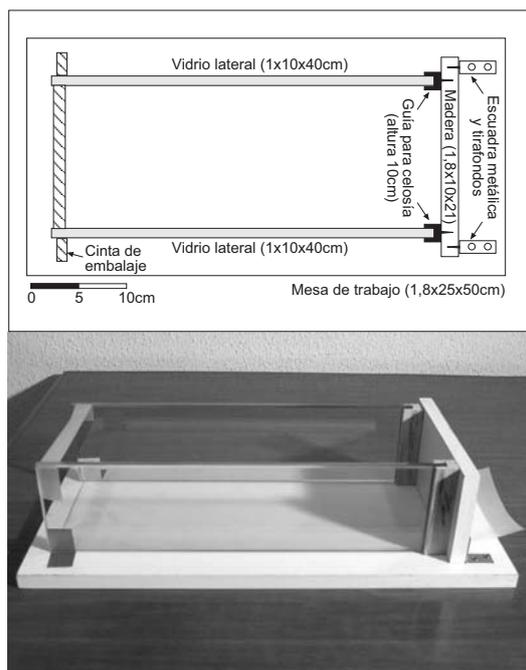


Fig. 1. Esquema en planta y foto de la mesa de experimentación. Observen como la lámina de papel vegetal indeformable pasa por debajo de la madera vertical y como le sobra unos centímetros para poder tirar de ella.

El orden de montaje es el siguiente:

a) fijamos con tirafondos, en los extremos laterales de la tabla vertical de madera, dos guías con forma de "U" (guías para celosía, cuyas aberturas permitirán encajar posteriormente los vidrios laterales);

b) colocamos la madera vertical en un extremo de la mesa de experimentación, a unos 10 cm del borde, utilizando escuadras metálicas y tirafondos, y dejando un espacio suficiente a la base de la misma, para que por debajo de ella se pueda deslizar una lámina de papel, pero que impida el paso de la arena;

c) se colocan los vidrios laterales insertándolos en las guías; se fijan con cinta adhesiva, tanto en la base como entre ellos, para que no se muevan durante el experimento;

d) se coloca una lámina de papel vegetal, cortándola exactamente para que cubra completamente la base y que sobresalga unos 15 cm por debajo de la madera vertical; ésta es la parte que se va a utilizar para tirar de ella; esta lámina debe de moverse paralelamente a los vidrios laterales, pasando ligeramente por debajo del biselado del vidrio, y sin que se separe de ellos; por otra parte, cabe destacar que la elección de papel vegetal indeformable no es baladí, sino que los resultados del experimento están muy influidos por el coeficiente de rozamiento entre la arena y el papel vegetal indeformable (Liu et al. 1991).

### Preparación del paralelepípedo de arena

Es importante que la arena que se utilice para simular las rocas tenga un tamaño de grano homogéneo, ya que éste influye drásticamente sobre el coeficiente de fricción interna de la arena y, por lo tanto, sobre sus propiedades físicas (Liu et al., 1991). Así, antes de empezar a construir el paralelepípedo, es necesario tamizar la arena, para luego utilizar los granos de tamaño 0,2-0,3mm ó 0,3-0,4mm, aunque los resultados óptimos se alcanzan con los primeros. Una vez seleccionados los granos, se procede a teñir la mitad de ellos, con tinte de ropa o de pintura, remojándolo un día en el tinte y dejándolo secar sobre un radiador o al sol. Eso nos permitirá hacer capas de distintos colores, sin que cambien las propiedades físicas de la arena. Hay que tener en cuenta que para fabricar el modelo se necesita aproximadamente el equivalente a 1 dm<sup>3</sup> de arena, blanca y de colores. Se aconseja tener preparada una cantidad doble por lo que se pierde durante la preparación del paralelepípedo.

Con arena perfectamente seca, se procede a rellenar la parte interior de la mesa de experimentación, vertiendo la arena sobre la lámina de papel vegetal indeformable con la ayuda de un colador de cocina, de manera a que la arena se caiga uniformemente (Figura 2). Cuando se ha llegado a hacer una capa horizontal de unos dos o tres milímetros, se cambia a una arena de otro color, y así sucesivamente hasta alcanzar los 1,5 cm de espesor (lo más regular posible). Se recomienda el uso de guantes y una bata para evitar mancharse con la arena tintada. Para un espesor de 1,5 cm, se estima en media hora el tiempo de preparación del paralelepípedo de arena.



Fig. 2. Preparación del paralelepípedo de arena, con capas sucesivas de distintos colores. Se vierte la arena en zig-zag con un colador, para alcanzar la máxima regularidad posible en cuanto a espesor.

### Compresión del modelo

Una vez preparado el paralelepípedo de arena se procede a comprimir el modelo. Para ello, basta con tirar lentamente del extremo de la lámina de papel vegetal. Ésta puede pasar por debajo de la tabla vertical, pero no así la arena, que va a chocar contra la tabla, produciendo compresión en el paralelepípedo



Fig. 3. Compresión del paralelepípedo de arena, construido sobre una lámina de papel vegetal indeformable, tirando suavemente de ella. La lámina pasa por debajo de la madera vertical, mientras que la arena está obligada a deformarse por chocar contra la madera.

y su consiguiente deformación, con la formación de pliegues y cabalgamientos (Figura 3). Cabe destacar que se puede parar el experimento en cualquier momento, es decir dejar de tirar del papel vegetal, para comentar algún aspecto de la deformación progresiva que se está observando. Luego, se puede seguir acortando, sin que por ello se modifique el estilo de deformación. En un determinado momento, el peso de la cuña de arena deformada impide que se desarrollen más pliegues y cabalgamientos; el papel resbala por debajo de la arena y no se producen más pliegues ni cabalgamientos.

Sin paradas ningunas, el tiempo necesario para deformar el modelo no supera los dos minutos.

### ENSEÑANZAS DEL MODELO: DESARROLLO PROGRESIVO DE LA DEFORMACIÓN

Cuando la compresión actúa sobre el paralelepípedo de arena, tirando horizontalmente de la lámina de papel vegetal, las primeras estructuras resultan del “efecto de borde” de la tabla vertical y de la pieza de madera que sujeta el vidrio de la mesa de experimentación (Figuras 4 y 5). Son pliegues que se producen como consecuencia del acortamiento, pero que no tienen equivalentes en la naturaleza. Cuando aumenta el acortamiento y dejan de sentirse los efectos de la tabla vertical en la parte trasera del modelo, se produce un primer cabalgamiento inmediatamente por debajo y por delante de los primeros pliegues formados.

Este primer cabalgamiento se enraíza en el límite entre el paralelepípedo de arena y la lámina de papel vegetal subyacente. A través de las paredes laterales de vidrio, se observa como se inicia una pequeña ondulación de las capas. La amplitud de esta ondulación va aumentando, formándose así un pliegue, cuya cresta se va volcando progresivamente hacia la parte delantera del modelo. Así, se forma un pliegue asimétrico, llamado “vergente” hacia la parte delantera. Posteriormente, el flanco inferior del pliegue se hace cada vez más delgado, hasta



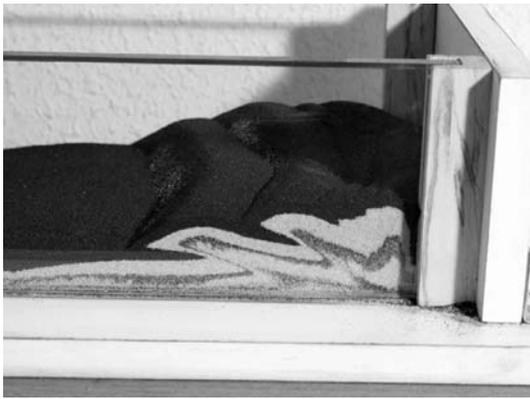


Fig. 4. Estadio final del experimento. Observen los pliegues pegados a la tablilla vertical, debido al efecto de borde de la misma y los dos cabalgamientos que se han producido en la parte más frontal del experimento. Ver también el dibujo interpretativo de la Figura 5.

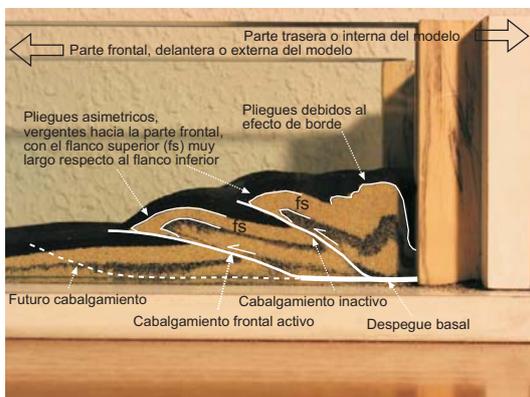


Fig. 5. Dibujo interpretativo, sobre una foto del estadio final del experimento, de las distintas estructuras formadas durante el mismo.

romperse, y se forma un verdadero cabalgamiento, es decir una falla inversa con poca inclinación. De este modo, en la parte frontal del modelo se duplica el espesor de arena. En efecto, el movimiento sobre el cabalgamiento, que actúa como una rampa, lleva al conjunto de capas de arena que se está deformando a elevarse y a cubrir la arena de la parte delantera del modelo, aún sin deformar. Así, la arena deformada dibuja una cuña (Figuras 4 y 5).

Cuando prosigue el acortamiento, la cuña tiene que incorporar más arena en la parte frontal del experimento y crecer. Como un cabalgamiento no puede ser activo (en movimiento) indefinidamente por razones físicas, se observa como la deformación “salta” hacia la parte delantera del experimento. Cada vez que se forma un nuevo cabalgamiento, llamado cabalgamiento “frontal”, el anterior deja de ser activo. De nuevo, el cabalgamiento siguiente se inicia con la formación de un pliegue muy suave, cuya amplitud y asimetría va aumentando hasta que se forme de nuevo una falla de poca inclinación en su flanco inferior. Este último cabalgamiento se enraza en el contacto entre la lámina de papel vegetal y la arena,

de igual modo que el anterior. Además, se puede observar que mientras el cabalgamiento frontal está activo, las anteriores estructuras, formadas en la parte trasera del modelo rotan de manera pasiva.

El desarrollo de cabalgamientos sucesivos produce saltos reiterativos del frente de deformación, es decir de la posición del cabalgamiento frontal activo, que se va desplazando hacia la zona externa del modelo. Este proceso produce así lo que se llama un “sistema de cabalgamientos imbricados”, vergentes hacia la parte externa del modelo. La superficie sobre la que se enraza todos los cabalgamientos, se conoce como el “despegue basal”.

## ¿CUAL ES EL PARÁMETRO DEL MODELO QUE SE PUEDE MODIFICAR?

En la superficie del modelo, se observan las trazas de los cabalgamientos como líneas que deberían ser perfectamente rectas en el caso de un espesor constante pero que debido a las imperfecciones del paralelepípedo inicial son sinuosas (Figura 4). En realidad, la longitud de las escamas que se forman durante el experimento es inversamente proporcional al espesor del paralelepípedo inicial, por lo que si se repite el experimento, pero con un espesor inicial menor, de 1,0 cm por ejemplo, el número de escamas formadas deberían de ir aumentando (ver Liu et al., 1991)

Cabe destacar que con un espesor inicial de 1,5 cm, tal como se propone en el montaje de la mesa de experimentación en este taller, es posible reproducir dos a tres escamas cabalgantes. Por supuesto si se alarga la mesa de experimentación y los vidrios laterales, por ejemplo una decena de centímetros, se puede simular un número mayor de cabalgamientos, aunque en este caso, habría que tener en cuenta que la cantidad de arena necesaria aumenta.

## COMPARACIÓN CON UN CASO NATURAL DE SISTEMA DE CABALGAMIENTOS

La comparación de los resultados alcanzados en este taller durante la simulación de un sistema de pliegues y cabalgamientos por compresión de un paralelepípedo de arena, con un caso natural como por ejemplo, el de la Sierra de Alcaraz (continuación hacia el norte de las Sierras de Cazorla y Segura), en la Cordillera Bética (Figura 6), muestran una gran similitud, a pesar de un factor de escala del orden de  $10^7$  (un centímetro en el modelo equivale a 1 km de espesor de rocas en la realidad).

En efecto, la interpretación de los datos de superficie que aparecen en el mapa de la figura 6 permite dibujar el corte geológico que aparece en la figura 7, cuyo trazado se localiza en la figura anterior. Representa un corte vertical del terreno con la geometría de los distintos niveles que conforman el subsuelo. Son capas de rocas carbonatadas, tales como las calizas. Se observa una imagen muy semejante a la que se ha generado al final del experimento, con un despegue basal sobre el que se en-



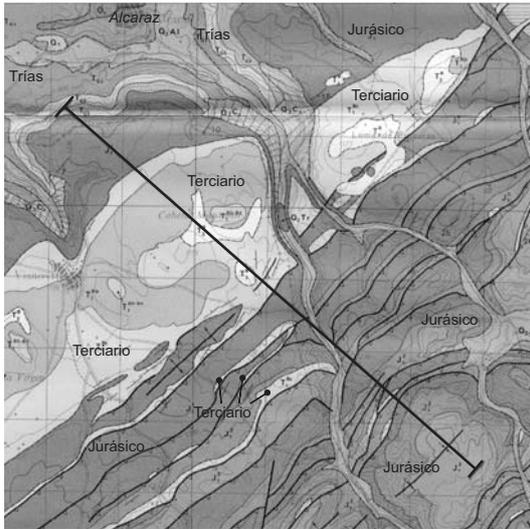


Fig. 6. Reproducción de la esquina NW de la hoja geológica 1:50.000 de Alcaraz (Rodríguez y García 1980), donde se observan diversas repeticiones de niveles azules o amarillos (calizas de edad Jurásico y calcarenitas del Terciario, respectivamente), a favor de cabalgamientos (líneas gruesas con triángulos), con dirección de transporte hacia el NW. La localización del corte de la figura 7 se resalta con una línea gruesa.

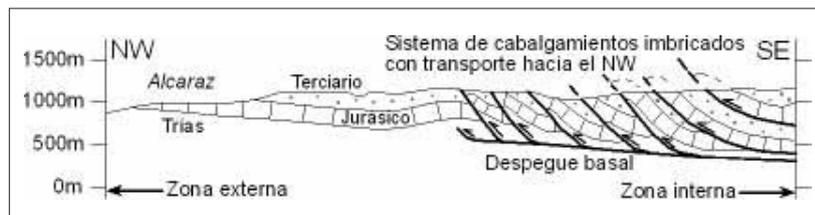
raízan numerosos cabalgamientos. La activación de este sistema de cabalgamientos ha producido la duplicación y rotación de las capas de referencia (la arena de diversos colores de nuestro experimento).

Otros ejemplos de la geología de España que muestran estructuras semejantes, son las sierras de Montsec, Boumort y Cadi en el Prepirineo Catalán, la Sierra de Albarracín y Serranía de Cuenca en el Sistema Central, la Sierra de Cazorla y Segura en las Béticas y los Picos de Europa en la Cordillera Cantábrica, por citar a los más conocidos.

Así, a pesar de las limitaciones de estos modelos a pequeña escala, tales como por ejemplo la imposición de la geometría del despegue basal (el límite entre la arena y la hoja de papel vegetal indeformable), se ha mostrado la utilidad de este tipo de experimentación para reproducir la formación de sistemas de cabalgamientos asociados a pliegues, tales como los que se puedan observar en diversos casos naturales de las montañas de la geografía española.

Sin duda, un taller de estas características en un Laboratorio de Enseñanzas Secundarias ayudaría a divulgar el hecho de que las montañas no son tan fijas como uno puede pensar. Utilizando unos mate-

Fig. 7. Corte geológico correspondiente al mapa de la Figura 6 (localización en la misma). Observen el sistema de cabalgamientos que se enraízan en un despegue basal y que producen la duplicación de las capas.



riales adecuados, del mismo modo que se ha reducido extremadamente la escala, se ha reducido el tiempo: en algunos segundos se ha simulado unas estructuras geológicas que se forman en varios millones de años. Además, se acerca al estudiante a unas técnicas de Laboratorio que se utilizan en la investigación básica (Liu et al. 1991; Crespo-Blanc, 2002 y referencias en estas publicaciones).

## AGRADECIMIENTOS

Este taller ha sido financiado por el Proyecto BTE2000-0581 del MCyT.

## BIBLIOGRAFÍA

Crespo-Blanc, A. (2002). [www.ugr.es/~geodina/](http://www.ugr.es/~geodina/). Página web del Laboratorio de Modelizaciones analógicas del Departamento de Geodinámica de la Universidad de Granada, creada en 2002 revisada trimestralmente.

Liu, H., McClay, K.R. y Powell, D. (1991). Physical models of thrust wedges. In: McClay, K. R. (Eds.), Thrust tectonics. London, Chapman and Hall, pp. 71-81.

Rodríguez, T. y García, A. (1980). Hoja Alcaraz nº 841. Mapa geológico de España, 1:50'000. IGME, Madrid.

## APÉNDICE:

Lista completa del material y costes aproximados (enero 2004):

- Dos tablas de madera (grosso 1,8cm) canteada de 25x50cm y 10x21cm, en tienda de maderas o bricolaje (4 €)
- Dos láminas de vidrio (grosso 1cm), con filos biselados (muy importante para evitar cortes) 10x40cm, en cristalería (13 €)
- Guías de madera para celosía (piezas de madera con forma de "U", con una abertura igual al espesor de los vidrios laterales), tienda de maderas o bricolaje (2 € la tira de 1m)
- Dos escuadras metálicas y tirafondos, en ferretería (1,4 €)
- Cinta adhesiva, en papelería (0,6 € el rollo)
- Papel vegetal indeformable, en papelería (0,8 € por metro)
- Arena tamizada de tamaño de grano 0.2 a 0.3mm, o 0.3 a 0.4mm. Se pueden coger pequeñas cantidades en la playa, comprarla en una cantera o en tiendas de animales domésticos, como arena para acuarios (0 € a 3 €)
- Tinte para ropa o pintura, en droguería (2 €)

Coste total máximo de la mesa de experimentación: 26,8 €

Se supone que se dispone de pequeñas herramientas para montar la mesa, así como tamices con luz de 0,2, 0,3 y 0,4mm, en caso de tener que tamizar la arena. ■

