

Cómo reproducir diapiros en el aula

Playing diapirs in the classroom

TERESA ROMÁN-BERDIEL Y PABLO SANTOLARIA OTÍN

Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza. mtdjrb@unizar.es y psotin@unizar.es

Resumen La modelización analógica de estructuras diapíricas fue clave para comprender los factores que controlan los procesos diapíricos. En la enseñanza de la geología, la tectónica experimental es un instrumento muy eficaz para facilitar al estudiante la observación directa de los procesos tectónicos. En este trabajo se presenta un dispositivo experimental muy sencillo que permite reconstruir y comprender el desarrollo de un proceso diapírico, poniendo en evidencia el parámetro fundamental (densidad) que lo controla. Este experimento ayuda a comprender cómo rocas enterradas a gran profundidad pueden ascender a través de las rocas suprayacentes generando diapiros. El modelo experimental se compara con un ejemplo natural, lo que permite al alumno comprobar la validez de los modelos analógicos para corroborar las hipótesis de partida.

Palabras clave: Diapiro, diferencia de densidad, ejemplo natural, modelización analógica.

Abstract *The analogue modelling of diapiric structures was key to understanding the factors controlling diapiric processes. In the teaching of geology, experimental tectonics is a powerful tool to provide the student with direct observation of tectonic processes. This paper presents a simple experimental setup that allows reconstructing and understanding the development of a diapiric process, highlighting the fundamental parameter (density) that controls it. This experiment helps to understand how deeply buried rocks can ascend through the overlying rocks generating diapirs. The experimental model is compared with a natural example, allowing students to check the validity of analogue models to corroborate the hypotheses.*

Keywords: *Analogue modelling, diapir, differential density, natural prototype.*

INTRODUCCIÓN

Los modelos experimentales o analógicos aplicados a las Ciencias de la Tierra constituyen simulaciones a escala en el laboratorio de procesos geológicos. Probablemente la primera documentación sobre un experimento simulando un proceso geológico fue presentado en *Transactions of the Royal Society of Edinburg* por Sir James Hall en 1815. Allí describió el primer intento de modelizar pliegues observados en estratos geológicos. Este experimento ilustró hace ya casi dos siglos el potencial de las técnicas de modelización para entender las estructuras geológicas.

A partir de ese momento, muchos otros modelizadores han estudiado la formación de pliegues y fallas, y diferentes técnicas han sido utilizadas para construir modelos analógicos de procesos tectónicos a diferentes escalas. La modelización experimental de procesos tectónicos ha cubierto un am-

plio rango de situaciones tectónicas, que incluyen el análisis de la formación y evolución de fallas direccionales, cinturones de pliegues y cabalgamientos, sistemas de fallas normales, el emplazamiento de diapiros, procesos de subducción y rifting, por ejemplo. La ventaja de esta técnica es que permite analizar la influencia de determinados parámetros de forma independiente en los procesos geológicos, y ayuda a precisar la evolución, las causas y los mecanismos de los procesos geológicos que han dado lugar a las estructuras que se observan en la naturaleza. Por lo tanto, la modelización analógica no debe entenderse como una reproducción exacta de las estructuras de un área concreta con todas sus variables, sino como un útil que ayuda a aclarar aspectos sobre el origen de las mismas.

Además de su utilidad en investigación, es bien conocida su aplicación en la didáctica de la geología. Los modelos experimentales acercan al alumno a la realidad de los conceptos impartidos ya que per-

miten la observación directa de las condiciones necesarias para la formación de las estructuras tectónicas, y permiten conocer la evolución en el tiempo y en el espacio de los distintos procesos y estructuras resultantes. Sin olvidar que también permiten al estudiante participar en la planificación y realización en equipo de experiencias científicas sencillas.

Son varias las publicaciones sobre la construcción de modelos experimentales sencillos para el aprendizaje de la geología estructural (Liesa *et al.*, 1997; Gil *et al.*, 1997) y en especial para observar la formación de sistemas de cabalgamientos y de fallas normales (Crespo-Blanc y Luján, 2004; Crespo-Blanc y Murcia López, 2006; Murcia López y Crespo-Blanc, 2008). Más escasos son aquellos sobre estructuras diapíricas y además se centran en el estudio de las estructuras que el proceso diapírico genera en las rocas encajantes (Fonseca *et al.*, 2001), más que en el propio proceso diapírico.

En este trabajo se describen y se dan las pautas necesarias para la realización de un experimento muy sencillo de simulación de la formación de un diapiro. Los experimentos permitirán observar las condiciones necesarias para que se desencadene el proceso diapírico y estudiar cómo influye uno de los parámetros fundamentales (la diferencia de densidades) que lo condicionan.

DIAPIRISMO

El diapirismo es, a menudo, un tema ignorado en los tratados de Geología Estructural y Tectónica. Sin embargo, se trata de un proceso de gran importancia en relación con la dinámica interna de la Tierra y la geología estructural, y podemos encontrarlo a diferentes escalas y en contextos geológicos muy distintos. El diapirismo, es el proceso de ascensión de material poco denso a través de rocas suprayacentes más densas que constituirán la roca encajante. Por tanto, un diapiro es un cuerpo rocoso que se ha desplazado hacia arriba atravesando los estratos suprayacentes o cobertera.

El mecanismo motor o la fuerza motriz del diapirismo es la diferencia de densidad negativa entre el área fuente (que constituirá la masa diapírica) y

la cobertera (que constituirá la roca encajante). La dinámica de fluidos con gradientes de densidad inverso ha sido ampliamente estudiada tanto teóricamente como experimentalmente. Las inestabilidades de Rayleigh-Taylor están controladas por los siguientes factores (Fig. 1):

- la diferencia de densidades, siendo siempre $\rho_{\text{área fuente}} < \rho_{\text{cobertera}}$
- los espesores respectivos de sobrecarga o cobertera y área fuente o material que va a constituir el diapiro.
- las viscosidades de los dos medios, generalmente $\mu_{\text{área fuente}} < \mu_{\text{cobertera}}$.

Estos parámetros influyen en la velocidad de iniciarse el proceso, en la velocidad de adquisición del grado de madurez del cuerpo diapírico, y también en su forma (Woidt, 1978).

Para que la ascensión se produzca se necesita, además de una menor densidad, que proporcione la fuerza, la existencia de rocas suficientemente dúctiles como para fluir y la posibilidad de que las rocas superiores o suprayacentes puedan hacer sitio a la masa ascendente deformándose.

El diapirismo es un proceso muy común en todos los dominios de la Tierra. Puede afectar tanto a rocas sedimentarias en la parte superficial de la corteza terrestre, como a rocas profundas de la corteza inferior, o incluso en el manto dando lugar a *hotspots* o puntos calientes. En el caso de las rocas sedimentarias, los diapiros más abundantes están constituidos por evaporitas, y de ahí que se denominen diapiros salinos. También se encuentran diapiros formados por otros materiales como la arcilla y el barro. La arcilla y el barro son materiales muy plásticos y poco densos cuando están saturados en agua. Los diapiros de barro se forman porque éste es poco denso debido a la gran cantidad de agua y, a veces, de gas que contiene. Esto se debe a que no ha sido suficientemente compactado, y no ha perdido todavía gran parte de su porosidad al sedimentarse las capas superiores. Este fenómeno es típico de zonas con una velocidad de sedimentación elevada, como los deltas de ríos.

En relación con las zonas profundas de la corteza terrestre, y con procesos de deformación cortical, masas de material parcialmente o totalmente fundi-

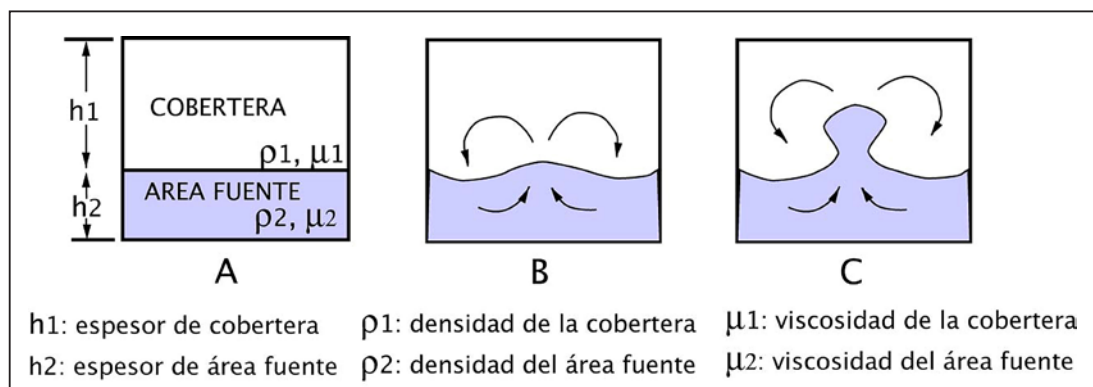


Fig. 1. Sistema inestable, con $\rho_2 < \rho_1$; el desarrollo de la inestabilidad conlleva movimientos convectivos.

das, tienden a ascender debido a su menor densidad respecto a las rocas de su entorno. De este modo se explica la formación de domos migmatíticos y el ascenso de masas plutónicas (intrusiones graníticas) a través de los materiales que constituyen el encajante, más denso.

Por último, en relación con la dinámica del manto y los procesos de convección, tiene lugar la formación de las llamadas plumas mantélicas. Las corrientes de convección se producen debido a la existencia de límites térmicos de capas, estando los principales en la parte superior e inferior del manto. El límite térmico superior es frío y el inferior es caliente. Las diferencias de temperatura producen diferencias de densidad en los materiales que componen el manto, de manera que los materiales más fríos y más densos tienden a hundirse y los calientes y menos densos tienden a ascender produciendo localmente las plumas mantélicas que se manifiestan como puntos calientes o *hotspots* en la superficie de la Tierra.

DIAPIRISMO SALINO

Los diapiros salinos son probablemente una de las estructuras mejor estudiadas, tanto por su interés científico como económico ya que en muchos casos constituyen trampas petrolíferas puesto que las evaporitas son rocas impermeables que detienen la migración del hidrocarburo a través de formaciones porosas. Las evaporitas se pueden encontrar formando capas de espesor considerable. Se forman en cuencas continentales endorreicas en las que la evaporación de agua es superior a los aportes fluviales debidos a precipitaciones. Se pueden generar también en mares interiores cuya comunicación con mar abierto es interrumpida durante cierto periodo de tiempo. Un ejemplo fue el Mediterráneo hace 6 m.a. (Mioceno sup.), cuando la comunicación con el Atlántico quedó cortada por el cierre del Estrecho de Gibraltar. Durante medio millón de años se acumularon varios cientos de metros (localmente hasta 2000 m) de evaporitas sobre el fondo de la cuenca marina (García-Castellanos y Villasenor, 2011).

Un ejemplo de depósitos evaporíticos de especial interés por formar la mayor parte de los diapiros de la Península Ibérica, lo constituye la sedimentación evaporítica del Triásico superior en las facies Keuper. Importantes cantidades de sales se depositaron en algunas cubetas de la placa Ibérica en relación con un periodo de subsidencia atenuada y regresión generalizada del mar del Tethys durante todo el Triásico superior, que corresponde a las últimas etapas de actividad del Rift Ibérico durante este periodo (Sánchez-Moya y Sopena, 2004).

Fue en el sur del Atlas sahariano de Argelia donde Ville describió por primera vez, en 1856, un domo que interpretó como el resultado de una intrusión

de sal en los sedimentos suprayacentes. El término diapiro fue introducido más tarde por Mrazec (1907). Las observaciones de campo indicaban que se trataba de intrusiones de sal que cortaban las capas depositadas por encima, lo que establecía que la sal presentaba una gran movilidad a la escala de los tiempos geológicos. A partir de allí, se han intentado entender y modelizar los procesos que permitían a formaciones evaporíticas, profundamente enterradas, atravesar las formaciones sedimentarias suprayacentes para emerger hasta la superficie. Una vez más la modelización analógica ha resultado ser una herramienta de primer orden en el entendimiento de los factores que controlan este proceso. A partir de los estudios de Ramberg (1967) se desarrolla enormemente el estudio de diapiros y estructuras relacionadas mediante modelos a escala, utilizando diversos materiales y técnicas (Dixon, 1975; Koyi *et al.*, 1993; Nalpas y Brun, 1993; Weijermars *et al.*, 1993; Costa y Vendeville, 2001; Sans, 2003 entre otros).

Génesis y propagación de diapiros salinos en la corteza superior

El mecanismo motor o la fuerza motriz del diapirismo, como se ha mencionado con anterioridad, es la diferencia de densidad negativa entre la masa diapírica y la roca encajante, diferencia que, en el caso de las rocas sedimentarias, puede no aparecer hasta que los sedimentos de la roca de caja no están consolidados, ya que su densidad en superficie puede ser incluso menor que la densidad de las evaporitas. Las evaporitas tienen densidades en torno a 2,2 gr/cm³. La densidad de las arcillas puede variar de 1,6 a 2,6 gr/cm³ dependiendo del grado de consolidación, los esquistos y las areniscas presentan densidades entre 2,1 y 2,6 gr/cm³ dependiendo de su edad, y la densidad de las calizas está en torno a 2,6 gr/cm³. Por tanto, el contraste de densidades máximo en estos medios será de 0,4 gr/cm³.

Por otra parte, la sal se comporta como un líquido muy viscoso, pero su viscosidad es baja si se compara con la de otras rocas sedimentarias. Además, la viscosidad disminuye con la profundidad, debido al aumento de temperatura. Una baja viscosidad está relacionada con una velocidad de deformación alta y, así, la sal puede fluir rápidamente incluso cuando los esfuerzos a los que está sometida sean pequeños. La velocidad de ascenso de un domo salino, que tiene que abrirse camino, se estima de unos 0,3 mm al año, es decir, 1 km cada tres millones de años aproximadamente.

Normalmente la sal empieza a fluir por la existencia de diferencias de carga debido a distinto espesor de los materiales de la cobertera, o a variaciones en la densidad de ésta. Uno de los factores típicamente desencadenantes de fenómenos diapíricos es la formación de fallas normales, ya que éstas crean

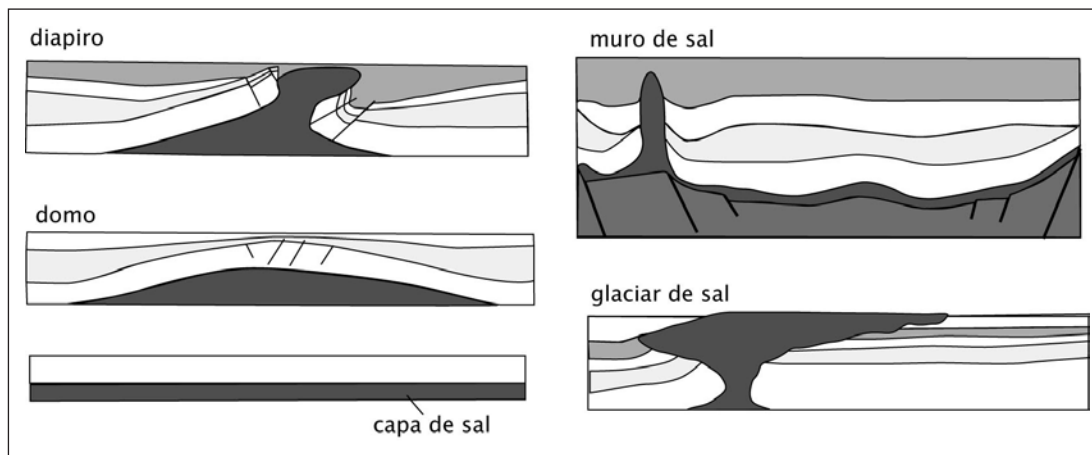


Fig. 2. Vista en corte de algunas de las geometrías más habituales que presentan los diapiros.

diferencias de carga en la cobertera que funcionan como detonante de los fenómenos diapíricos. Puede verse un video de una simulación en el laboratorio donde se observa dicha relación en Guglielmo *et al.* (1995). En este caso los diapiros pueden llegar a asociarse de forma muy estrecha con las fallas normales, y presentarse como *salt walls* o muros de sal. El diapirismo aparece también combinado con las deformaciones asociadas a cinturones de cabalgamientos. La propia forma en cuña de las unidades cabalgantes puede dar lugar a una migración, por diferencia de carga, de las sales que forman el nivel de despegue regional en el que enraiza el sistema de cabalgamientos (e.g. Sans, 2003).

Estructuras diapíricas

Las diferentes formas de los diapiros dependen de la ductilidad de las rocas encajantes y de las anisotropías que existan en ellas pero, en gran medida, dependen también de la evolución del diapiro en un momento dado, de manera que las diferentes formas representan a la vez distintos estadios en su evolución. Normalmente se diferencian los términos domo, para aquellas estructuras en las que no ha habido rotura de los estratos, pero sí un abombamiento de los mismos, y diapiro propiamente dicho, donde sí existe dicha perforación (Fig. 2). En el estado maduro llegan a adoptar forma de seta, con la parte superior considerablemente más ancha que la inferior. En otros casos, como ocurre en Irán en la Cordillera de los Zagros, la sal puede salir directamente hasta la superficie y seguir fluyendo, dando lugar a auténticos glaciares de sal (Fig. 2). Esto sucede en climas áridos, ya que en los húmedos la velocidad de disolución de la sal supera a la de extrusión. Cuando la ascensión de la sal se ve favorecida por la existencia de fallas normales los diapiros resultantes alcanzan grandes alturas, y tienen la forma de grandes muros o paredes de sal ya que siguen el plano de falla (Fig. 2).

Puesto que el corte de los estratos de la roca encajante no sigue unas reglas geométricas determinadas, la geometría en profundidad de un diapiro únicamente puede ser determinada mediante pros-

pección geofísica, a través, por ejemplo, de sísmica de reflexión o gravimetría gracias a la diferencia de densidades.

PREPARACIÓN DEL EXPERIMENTO

Para simular en el laboratorio procesos geológicos, de escala mucho mayor, han de reducirse las longitudes, los tiempos y la resistencia de los materiales. En este escalado, cientos de kilómetros pasan a metros y los millones de años pasan a horas. En cuanto a los materiales, habrá que utilizar materiales de baja resistencia, que se comportan de igual manera que las rocas sometidas a grandes presiones durante largos periodos de tiempo (millones de años). Para la modelización del proceso diapírico objeto de este trabajo se utilizan fluidos viscosos con contrastes de densidades suficientes para generar el diapiro.

El experimento que se propone es puramente cualitativo, con un dimensionamiento grosero de longitudes, tiempo y resistencia de los materiales, sin pretender aplicar, en ningún caso, un dimensionamiento cuantitativo que permita el estudio matemático riguroso del fenómeno.

Objetivos del experimento

Los objetivos principales del experimento son dos:

1. Que el estudiante observe cómo se desarrolla, en el laboratorio, un proceso de ascenso diapírico generado por un gradiente de densidad inverso entre el material que constituye el diapiro y el que lo rodea o, en otros términos, por la flotabilidad del material que constituye el diapiro.
2. Observar las diferencias en la evolución del proceso en función del diferente contraste de densidades entre ambos materiales.

Material necesario

- Tarro de cristal con tapa
- Ketchup, que tiene una densidad ρ en torno a 1 gr/cm^3

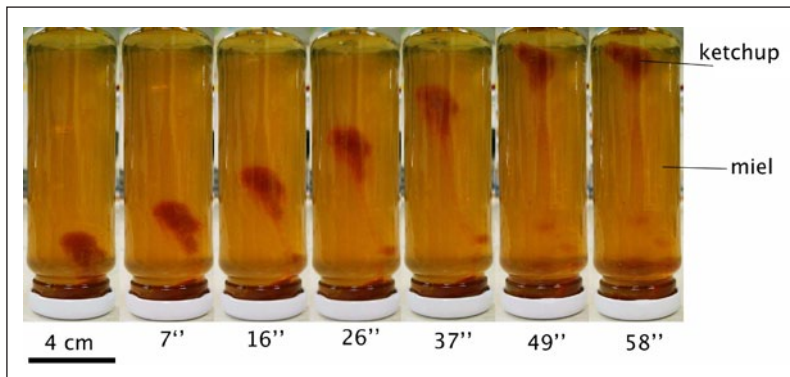


Fig. 3. Fotografías secuenciales de la evolución del proceso diapírico generado utilizando miel como material encajante y Ketchup como material constituyente del diapiro. Contraste de densidades inverso de $0,4 \text{ gr/cm}^3$. Tiempo en segundos.

- Detergente lavavajillas, que tiene una densidad ρ en torno a $0,8 \text{ gr/cm}^3$
- Miel, que presenta una densidad ρ en torno a $1,4 \text{ gr/cm}^3$

Un buen ejercicio antes de realizar el experimento es calcular las densidades de los materiales. Este cálculo es necesario si se utilizan materiales cuyas propiedades no se conocen. Para la realización de este cálculo será necesario disponer de una balanza y un vaso de precipitado graduado.

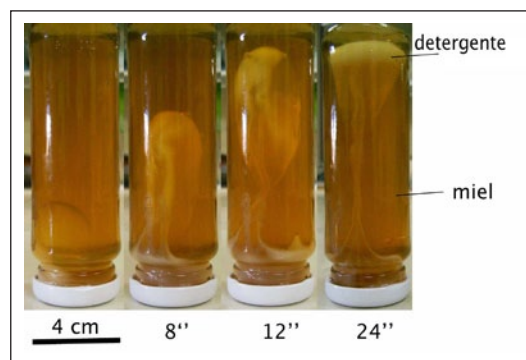
La miel es el material que va a representar al encajante, y el hecho de ser transparente permitirá observar cómo se genera y progresa el diapiro.

El Ketchup y el detergente lavavajillas son los materiales que van a representar al material diapírico. La diferencia de densidades entre diapiro y cobertera será de $0,4 \text{ gr/cm}^3$ cuando se utiliza el Ketchup, y de $0,6$ cuando se utiliza el detergente. Por lo tanto, el contraste de densidad entre el Ketchup y la miel es el mismo que el que se observa entre evaporitas y rocas sedimentarias.

Fases de la actividad

- El profesor plantea el problema sobre el que se va a trabajar. Antes de iniciar el experimento recomendamos recordar a los estudiantes los conceptos de masa y densidad, así como los conceptos de escala y de material analógico.
- El alumno realiza, individualmente o en grupo, el trabajo propuesto, mientras el profesor supervisa.
- Presentación y comentario de los resultados por parte de los alumnos, con participación del profesor como moderador (pregunta, coordina y complementa).

Fig. 4. Fotografías secuenciales de la evolución del proceso diapírico generado utilizando miel como material encajante y detergente como material constituyente del diapiro. Contraste de densidades inverso de $0,6 \text{ gr/cm}^3$. Tiempo en segundos.



DESARROLLO DEL EXPERIMENTO

Se propone la realización de dos experimentos

Experimento 1

El tarro de cristal se llena del material más denso (miel) hasta casi la totalidad de su capacidad. Sobre la miel se deposita una cucharadita de Ketchup de manera que quede totalmente lleno el bote y se cierra. El proceso se inicia invirtiendo el tarro, de manera que quede el tape en la posición inferior. El Ketchup es menos denso y por tanto tenderá a ascender formando un diapiro, pero puede quedar en equilibrio metaestable bajo la miel por lo que el proceso puede tardar un poco a iniciarse y puede ser necesario mover un poco (inclinarse un poco) el bote para romper dicho equilibrio. El inicio del proceso puede verse favorecido por la presencia de una pequeña burbuja de aire. El hecho de que la miel sea transparente permite la observación de la evolución del diapiro de Ketchup con el paso del tiempo. La Fig. 3 muestra distintos estadios de su evolución. El Ketchup asciende a través de la miel formando un diapiro cuya geometría va variando a lo largo del proceso. El proceso diapírico se desarrolla en un tiempo total de 60 segundos, desde los estadios iniciales el diapiro presenta una geometría lobular, adquiriendo en los estadios finales una geometría de seta asimétrica. La geometría más o menos asimétrica del diapiro puede variar dependiendo del punto en que se inicia el proceso, más simétrico cuando asciende por la parte central del tarro, asimétrico si se inicia el ascenso por una zona próxima a la pared del tarro. En todos los casos la geometría del diapiro en su ascenso es lobular y adquiere la forma de seta es su estadio final.

Experimento 2

Se repite el experimento sustituyendo el Ketchup por detergente. El contraste de densidad entre la miel y el detergente es mayor, por lo que el proceso se desarrolla más rápido, tardando sólo 30 segundos en completarse el ascenso diapírico. El diapiro asciende con geometría globular para adquirir en su estadio final geometría de seta. En la Fig. 4 pueden observarse distintos estadios de su evolución. Pueden verse los videos de los experimentos en <http://wzar.unizar.es/acad/fac/geolo/equipamiento/video.htm>

Una vez terminado el experimento se solicita a los estudiantes que expliquen lo que sucede cuando se invierte el bote. Hacer notar como se acelera el proceso cuando el contraste de densidades aumenta.

COMPARACIÓN CON UN EJEMPLO NATURAL

Los modelos experimentales han de ser confrontados con datos reales, sin lo cual un modelo analógico no sería más que un experimento. La comparación permite verificar las hipótesis tectó-

nicas propuestas, o en algunos casos, reinterpretar los datos naturales desde un punto de vista diferente.

Las estructuras diapíricas son muy frecuentes en la naturaleza. Existen numerosos ejemplos de diapiros salinos submarinos que han sido puestos de manifiesto por estudios de prospección sísmica. Éstos aparecen principalmente en márgenes pasivos (costas atlánticas norteamericana y africana) y en relación con rift intracontinentales (mar del Norte). También existen buenos ejemplos aflorando en superficie. Una de las regiones del planeta con ejemplos más espectaculares se encuentra en los Montes Zagros (Irán), donde la erosión de las capas suprayacentes y el contraste de colores entre las distintas litologías, permite observar los diapiros en superficie como en el caso del Kuh-e-Namak (Fig. 5). En otras ocasiones el relieve indica la existencia de un diapiro en el subsuelo (Fig. 5).

También en la Península Ibérica existen buenos ejemplos asociados a los materiales del Triásico con facies Keuper. Algunos de ellos son los diapiros de la zona Prebética entre los que destaca el Diapiro de Pinoso, los diapiros de la Cordillera Cantábrica entre los que cabe destacar los diapiros de Salinas de Añana, Cabezón de la Sal y Poza de la Sal, y los diapiros de las Sierras Marginales de la Cordillera Pirenaica entre los que se encuentran los diapiros de Naval, Estada y El Grado.

A continuación se comparan los modelos experimentales presentados con un ejemplo natural, el diapiro de Estada (Pirineo de Huesca), lo que permite al estudiante comprobar la similitud de las geometrías obtenidas en el laboratorio con la ob-

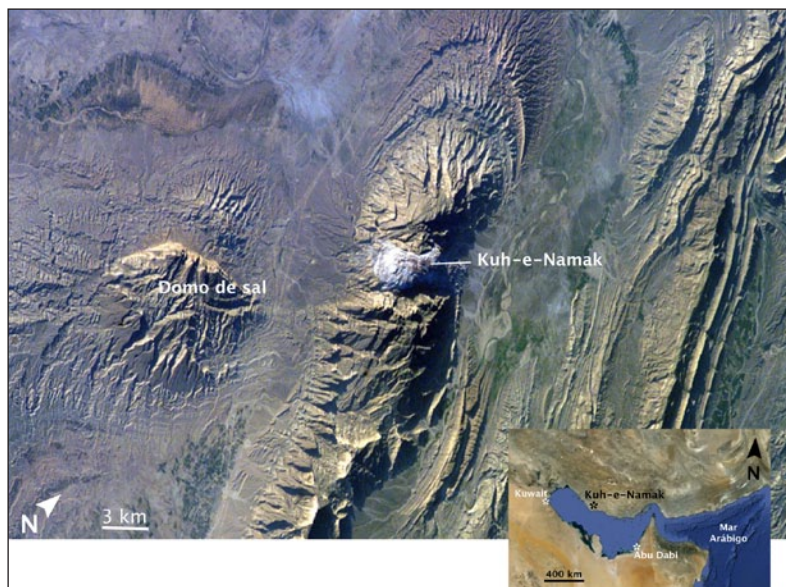


Fig. 5. Fotografía del diapiro Kuh-e-Namak en los Montes Zagros (Imagen cortesía de Image Science & Analysis Laboratory, NASA Johnson Space Center, ISS012-E-18774, <http://eol.jsc.nasa.gov>). Coordenadas geográficas del diapiro Kuh-e-Namak: Latitud 28° 15' 11,77"N; Longitud 51° 43' 4,60"E

servada en el caso real, y comprender cómo pudo formarse esta estructura.

El diapiro de Estada (Sierras Marginales, Pirineo)

A menudo las estructuras diapíricas no se encuentran aisladas sino que se agrupan en lo que podríamos llamar "provincias diapíricas". El diapiro de Estada pertenece a una de estas provincias que se encuentra en el límite Sur del Pirineo, en las llamadas Sierras Marginales de la Unidad Surpirenaica Central (Fig. 6A). La actividad de esta familia de diapiros se detuvo hace aproximadamente 20 ma (Santolaria, 2010). A pesar de su carácter ascendente, que en su momento pudo llegar a crear un relieve que sobresaliera por encima de los demás,

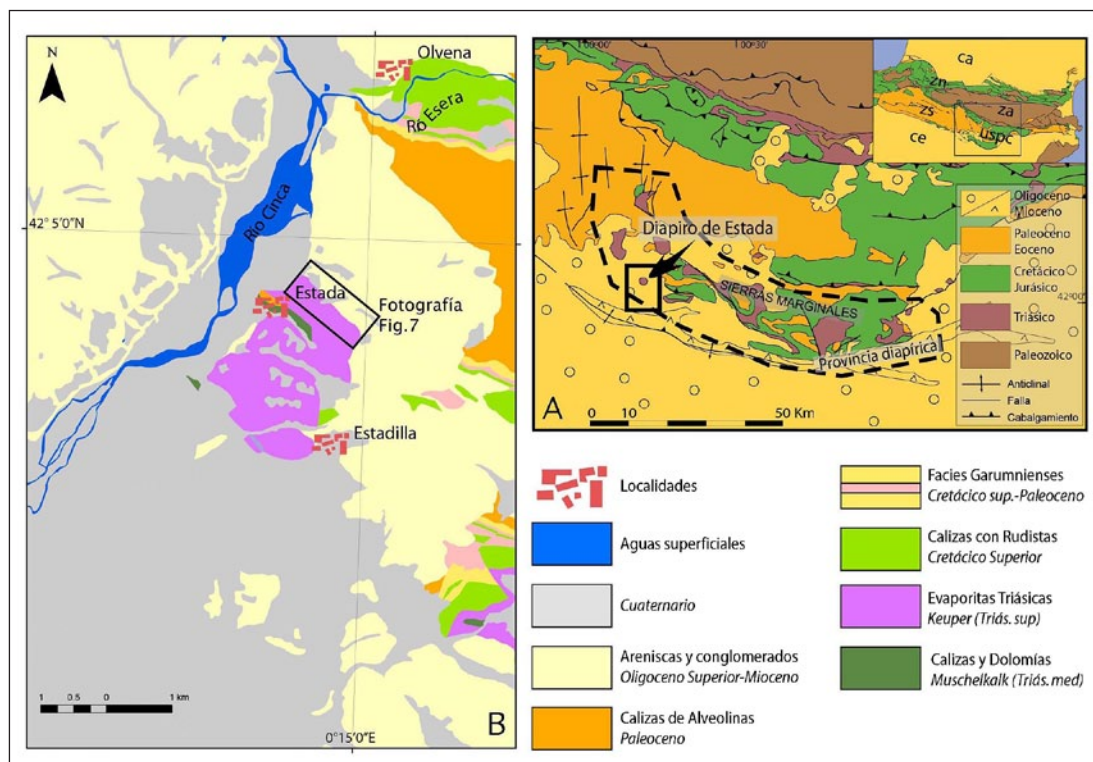
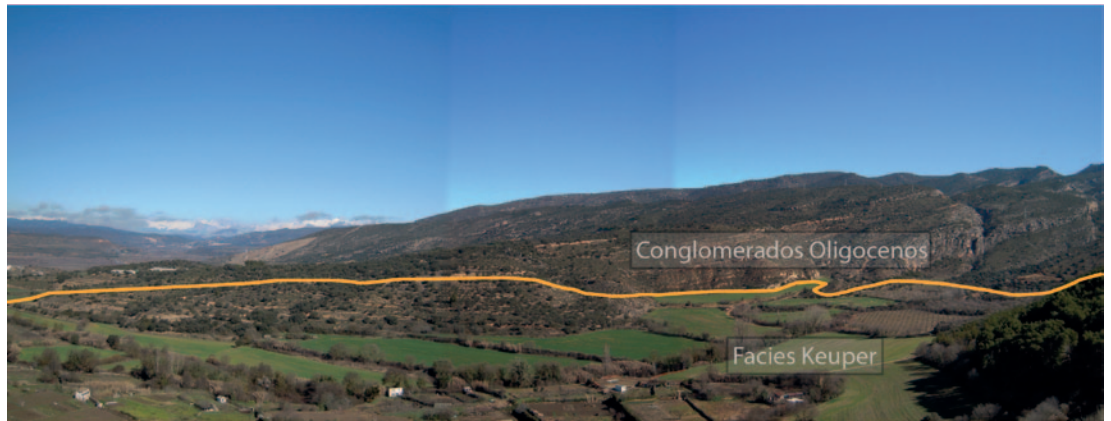


Fig. 6. A) Mapa geológico simplificado de la Unidad Surpirenaica Central con la situación del diapiro de Estada y su localización en el contexto de la Cordillera Pirenaica; ca: cuanca de Aquitania, zn: zona norpirenaica, za: zona axial, zs: zona surpirenaica, uspc: unidad surpirenaica central, ce: cuenca del Ebro. B) Mapa geológico del diapiro de Estada (Modificado de SIGECO, 2012).

Fig. 7. Vista panorámica del diapiro de Estada. Localización de la fotografía en la Fig. 6



la erosionabilidad de estos materiales evaporíticos y margosos modela el paisaje en forma de depresión con un fondo relativamente plano adecuado para la agricultura (Fig. 7).

En la superficie, el diapiro de Estada muestra una geometría subcircular (Fig. 6B), similar a la obtenida en los experimentos. Los materiales que constituyen este diapiro son evaporitas y margas del Triásico, las facies Keuper, con una densidad de alrededor de $2,3 \text{ gr/cm}^3$. Este valor contrasta con los valores de densidad de los materiales que rodean al diapiro: Depósitos terrígenos del Oligoceno-Mioceno en superficie ($2,4\text{-}2,6 \text{ gr/cm}^3$) y margas y carbonatos del Cretácico y Paleoceno en profundidad ($2,6 \text{ gr/cm}^3$). Como vemos el contraste de densidad, mecanismo motor del diapirismo, se cumple.

El carácter tridimensional de este tipo de estructuras geológicas y su complejidad en profundidad puede malinterpretarse si tan solo se consideran datos de superficie. Como se ha mencionado, la geofísica puede resultar útil a la hora de abordar la distribución de la sal migrada en profundidad. En este caso, a partir de la gravimetría se ha elaborado un modelo tridimensional de la distribución de las sales triásicas.

Así, el diapiro de Estada presenta un desarrollo vertical que alcanza casi 2,5 km de alto desde su base estrechándose hacia la superficie (Fig. 8). El mayor o menor desarrollo de los diapiros depende de varios factores: i) la duración de su actividad, ii)

la cantidad de material fuente y iii) el espesor de la cobertera que atraviesan. El desarrollo del diapiro de Estada se ve muy influenciado por el tercer factor. Al alcanzar la superficie los procesos de erosión-disolución truncan la evolución vertical de éste a pesar de que la actividad diapírica continúa. Por lo tanto, el desarrollo final del diapiro con la adquisición de la geometría de seta en la parte superior pudo alcanzarse aunque ya no pueda ser observado (corte Fig. 8).

CONCLUSIONES

Se ha presentado un dispositivo experimental muy sencillo que permite emular la formación y evolución de un diapiro.

Este experimento ayuda a comprender cómo rocas enterradas a gran profundidad pueden ascender a través de las rocas suprayacentes generando diapiros.

Se propone la realización del experimento dos veces utilizando dos materiales de densidad diferente para simular el diapiro, lo que permite observar como influye dicho parámetro en el proceso.

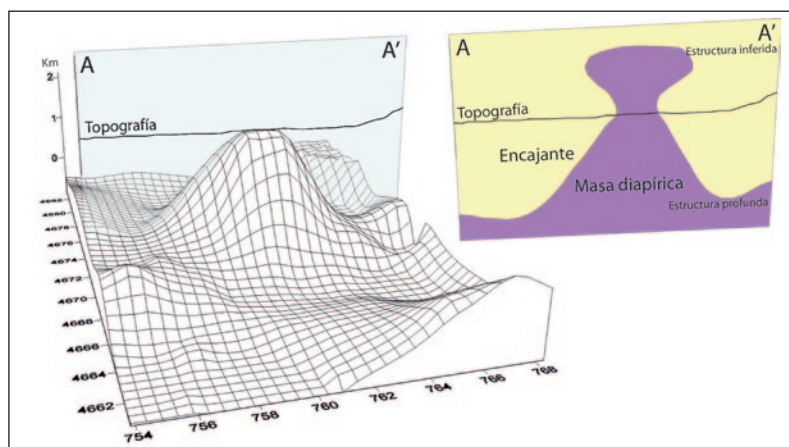
Se observa que cuando el contraste de densidad entre el diapiro y el encajante es mayor el proceso se desencadena y evoluciona más rápido.

Se muestra un ejemplo natural de un diapiro salino, en el que el estudiante puede observar la geometría real de dicho cuerpo, lo que le permite comparar con los modelos realizados en el laboratorio.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Elena Druguet y Ruth Soto por sus revisiones que han contribuido a mejorar el trabajo. Las experiencias presentadas en este trabajo se han desarrollado en el Laboratorio de Modelización Analógica de la Universidad de Zaragoza, y han constituido parte del programa de prácticas de la asignatura Modelización Analógica de Procesos Tectónicos del Master en iniciación a la investigación en Geología.

Fig. 8. Desarrollo 3D del diapiro de Estada, basado en datos de gravimetría (Santolaria et al., 2012), y corte esquemático con la reconstrucción de las partes erosionadas. Coordenadas Lambert.



BIBLIOGRAFÍA

- Costa, E. y Vendeville, B. (2001). Diapirism in convergent settings triggered by Hinterland pinch-out of viscous decollement: a hipótesis from modeling. In: H. A. Koyi (ed.) *Tectonic Modelling: a volumen in honor of Hans Ramberg. The Geological Soc. of America, Memoir 193*, 123-130.
- Crespo-Blanc A. y Luján, M. (2004). Cómo se forman las montañas: enseñanzas del laboratorio. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 12.1, 83-87.
- Crespo-Blanc A. y Murcia López, M.I. (2006). Cómo se forman los océanos: enseñanzas del laboratorio. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 14.2, 157-162.
- Dixon, J.M. (1975). Finite strain and progressive deformation in models of diapiric structures. *Tectonophysics*, 28, 89-124.
- Fonseca, P.E., Ribeiro, L.P., Caranova, R. y Filipe, P. (2001). Experimentación analógica sobre el desarrollo de un diapiro y la deformación producida en las rocas encajantes. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 9.3, 270-276.
- García-Castellanos, D. y Villasenor, A. (2011). Messinian salinity crisis regulated by competing tectonics and erosion at the Gibraltar Arc. *Nature* 480. 7377: 359-363. <http://lacienciaysusdemonios.com/2012/01/26/aislamiento-y-deseccacion-del-mediterraneo-durante-la-crisis-salina-del-mesiniense/>. Consulta: 07/05/2012.
- Gil, A., Cortés, A.L., Arlegui, L.E., Román, T. y Liesa, C.L. (1997). El uso de modelos experimentales en la enseñanza de Geología Estructural (I) Aplicación a la deformación continua. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 5.3, 219-225.
- Guglielmo, G., Jr., Vendeville, B. C., Schultz-Ela, D. D. y Jackson, M. P. A. (1995). Animations of salt diapirs, Part I: AGL95-MM-001. A BEG hypertext multimedia publication in the Internet at: <http://www.beg.utexas.edu/indasoc/agl/animations/AGL95-MM-001/index.html>. Consulta: 03/05/2012.
- Hall, J. (1815). On the vertical position and convolution of certain strata, and their relation with granite. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 7, 79-108.
- Koyi, H., Talbot, C.J. y Torudbakken, B.O. (1993). Salt diapirs of the Southwest Nordkapp Basin; analogue modeling. *Tectonophysics*, 228, 3-4, 167-187.
- Liesa, C.L., Román, T., Arlegui, L.E., Cortés, A.L. y Gil, A. (1997). El uso de modelos experimentales en la enseñanza de Geología Estructural (II) Aplicación a la deformación discontinua. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 5.3, 226-234.
- Murcia López, M.I. y Crespo-Blanc A. (2008). La formación de océanos y cadenas de montañas a partir de modelos analógicos: maquetas y nuevos materiales. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 16.2, 173-177.
- Nalpas, T. y Brun, J.P. (1993). Salt flow and diapirism related to extensión at cristal scale. *Tectonophysics*, 228, 349-362.
- NASA-Johnson Space Center (2012). Image Science and Analysis Laboratory, *ISS012-E-18774*. "The Gateway to Astronaut Photography of Earth." <http://eol.jsc.nasa.gov/info/use.htm>. Consulta: 05/04/2012 13:31:47.
- Mrazec, L. (1907). Despre cute cu simbure de strapungere. *Society of Stiite Bulletin*, 16, 6-8.
- Ramberg, H. (1967). *Model Studies in relation to intrusion of plutonic bodies*. In: G. Newall & N. Rast. *Mechanisms of Igneous Intrusion*. Liverpool, Seel House Press, 261-286.
- Sánchez-Moya, Y. y Sopeña, A. (2004). *El Rift Mesozoico Ibérico*. En : Geología de España (J.A. Vera Ed.), SGE-IGME, Madrid, 484-522.
- Sans, M. (2003). From thrust tectonics to diapirism. The role of evaporites in the kinematic evolution of the eastern South Pyrenean front. *Geologica Acta*, 1, 3, 239-259. www.geologica-acta.com.
- Santolaria, P. (2010). *Estructura de las Sierras Marginales en el sector Olvena-Calasanz*. Trabajo Académicamente Dirigido. Universidad de Zaragoza, 67 pp.
- Santolaria, P., Casas, A.M., Soto, R. y Casas, A. (2012). Análisis de las anomalías gravimétricas de la terminación suroccidental de la Unidad Surpirenaica Central. VIII Congreso Geológico de España, Oviedo. *Geo-Temas*, 11, 04_164 O.
- SIGECO (2012). Sistema de información de cartografía geológica continua escala 50.000 del PLAN GEODE, Hoja 288 (Fonz), IGME. <http://cuarzo.igme.es/sigeco/default.htm>. Consulta: 10/05/2012.
- Ville, L. (1856). Notice géologique sur les salines des Zahrez et les gites de sel gemme de Rang el Melah et d'Ain Hadjera (Algérie). *Annales des Mines*, 15, 351-410.
- Weijermars, B., Jackson, M.P.A. y Vendeville, B. (1993). Rheological and tectonic modeling of salt provinieses. *Tectonophysics*, 217, 1-2, 143-174.
- Woidt, W.D. (1978). Finite element calculations applied to salt dome analysis. *Tectonophysics*, 50, 369-386. ■

Fecha de recepción del original: 15/05/2012

Fecha de aceptación definitiva: 17/07/2012