

Los terremotos en el registro estratigráfico: recursos educativos

Earthquakes in the stratigraphic record: teaching resources

PEDRO ALFARO¹, MASSIMO MORETTI² Y GERAINT OWEN³

¹ Departamento Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente, Facultad de Ciencias, Universidad de Alicante, 03080 Alicante. E-mail: pedro.alfaro@ua.es

² Dipartimento di Scienze della Terra e Geoambientali, Università degli Studi di Bari. Aldo Moro, Via Orabona 4, 70125 Bari, Italy. E-mail: massimo.moretti@uniba.it

³ Department of Geography, Swansea University, Singleton Park, Swansea SA2 8PP, Wales, UK. E-mail: g.owen@swansea.ac.uk

Resumen Los terremotos, a partir de una cierta magnitud, pueden dejar huella en el registro estratigráfico. Este artículo se centra en las estructuras sedimentarias de deformación producidas por licuefacción, que reciben el nombre de sismitas. Se ofrecen algunas ideas y recursos para que el alumnado aplique varios principios estratigráficos básicos en la interpretación de estos paleoterremotos. Además, se incluyen algunos recursos de internet y algunos modelos análogos sencillos. El análisis y estudio de estas estructuras ayuda al alumnado a comprender que los sedimentos no son únicamente el resultado del ambiente sedimentario en el que se depositaron, sino que también son capaces de registrar eventos externos a la cuenca como es el caso de los terremotos. La utilización del registro estratigráfico de los terremotos como herramienta didáctica tiene un gran potencial por la infinidad de recursos en internet, con grabaciones cada vez más frecuentes y de mayor calidad de los efectos de los terremotos más recientes, que permite aplicar al alumnado, de forma sencilla, el principio del actualismo.

Palabras clave: Estructuras sedimentarias de deformación, licuefacción, modelos análogos, sismitas, terremotos.

Abstract *Earthquakes above a certain magnitude can leave traces in the stratigraphic record by deforming sediments. This paper focuses on soft-sediment deformation structures induced by liquefaction, known as seismites. We offer ideas and resources, so that students can apply basic stratigraphic principles to the interpretation of paleoearthquakes. We also include Internet resources and simple analogue models. The analysis and study of these sedimentary structures will help students understand that sedimentary deposits are not only influenced by the environment in which they were deposited, but also by external processes such as earthquakes. The stratigraphic record of earthquakes is a powerful didactic tool due to the large amount of images and videos of the effects of recent earthquakes, which readily enable students to apply the principle of actualism.*

Keywords: *Analogue models, earthquakes, liquefaction, seismites, soft-sediment deformation structures.*

INTRODUCCIÓN

Todos los años se producen millones de terremotos en nuestro planeta, algunos de los cuales provocan efectos devastadores. Cuando los terremotos alcanzan una determinada magnitud (habitualmente $M > 5$), suelen dejar su impronta en el registro estratigráfico. Estas evidencias pueden ser **primarias** cuando han sido generadas directamente por el desplazamiento en la falla, o **secundarias** cuando son producidas por la vibración asociada al

terremoto (ver detalles en McCalpin, 2009; Masana et al., 2011).

En relación con las evidencias secundarias, la sacudida sísmica o vibración producida por las ondas sísmicas desencadena varios fenómenos geológicos entre los que destacan la licuefacción y los movimientos de ladera (Delgado, 2011, los denomina efectos geotécnicos de los terremotos).

La licuefacción y los movimientos de ladera inducidos por terremotos deforman el sedimento y, si se dan las condiciones adecuadas, pueden

conservarse en el registro estratigráfico. En la literatura científica se ha extendido el uso del término “sismita” para denominar a las estructuras sedimentarias de deformación producidas por terremotos, que están limitadas a techo y a muro por horizontes no deformados (Fig. 1).

Existe una extensa literatura científica entre la que destacan algunos libros o recopilaciones de trabajos (Allen, 1982; Jones y Preston, 1987; Maltman, 1994; Obermeier, 1996; Etthensohn et al., 2002). Recientemente, la revista *Sedimentary Geology* ha publicado un número especial sobre este tema (Owen et al., 2011) en el que están referenciados los artículos científicos más destacados.

Estas estructuras tienen un gran potencial didáctico, permitiendo plantear al alumnado numerosas cuestiones sobre el registro geológico, los terremotos, los principios básicos de la Geología, entre otros. En la figura 2 hemos incluido, como



muestra, una sencilla actividad para que el docente pueda introducir el tema.

Este artículo se centra en las estructuras de licuefacción producidas por terremotos, ofreciendo algunos recursos de internet y algunos modelos análogos sencillos.

Fig. 1. Fotografía de estructuras de deformación en sedimentos lacustres de la cuenca de Guadix-Baza interpretados como sismitas (Alfaro et al., 2010).

Actividad	
Observa la siguiente fotografía	
A.	
¿Qué material es más antiguo? ¿Y el más moderno? ¿Qué principio geológico has utilizado?	Lógicamente, si se aplica el Principio de la superposición de estratos, el material más antiguo es el A y el más moderno es el C.
B.	
¿Cuándo se han formado las estructuras de deformación? ¿Qué principio geológico has utilizado?	Aplicando el Principio de las relaciones de corte, la deformación se ha producido después del depósito de A y B, y antes del depósito de C.
C.	
¿Crees que ha podido originarse por un esfuerzo tectónico? Antes de responder, piensa si un esfuerzo tectónico podría plegar un único estrato (B), sin deformar el material A.	Si lo comparamos con esfuerzos compresivos que pliegan las rocas, no es posible. Este tipo de esfuerzos hubiese plegado los materiales A y B (si la deformación es anterior al depósito de C).
<p>Información suministrada por el profesor al final de la actividad <i>La deformación se ha producido después del depósito de B y antes del depósito de C. Por tanto, el sedimento en esos momentos estaba poco o nada consolidado. En estas condiciones, procesos como la licuefacción (sísmica o debida a otros agentes geológicos) es capaz de deformar el sedimento y producir estas estructuras. Como complemento, el docente puede utilizar sencillos modelos análogos (ver algunos ejemplos en el artículo).</i></p>	

Fig. 2. Las estructuras sedimentarias de deformación permiten plantear al alumnado cuestiones interesantes. En el cuadro de la figura 2 se plantean algunas preguntas para estudiantes de enseñanza secundaria y bachillerato.

LA LICUEFACCIÓN SÍSMICA

La licuefacción de un suelo se define como la transformación de un sólido saturado a un estado líquido como consecuencia de un incremento de la presión que ejerce el agua contenida en los poros del material (Seed e Idriss, 1971). Delgado (2011), en su apartado “Licuefacción” utiliza ejemplos magníficos y sencillos para comprender cómo los terremotos producen licuefacción. También Masana et al. (2011) incluyen algunos gráficos muy interesantes sobre licuefacción sísmica y su registro geológico.

Requisitos para la licuefacción

Sin entrar en demasiados detalles, para que un terremoto produzca licuefacción son necesarias las siguientes condiciones:

1. suelo detrítico no cohesivo (principalmente arenas de grano fino y tamaño uniforme, poco compactadas).
2. suelo saturado en agua (nivel freático muy superficial).
3. terremoto con una magnitud mínima alrededor de 5.0 (a mayor magnitud mayores son los efectos de licuefacción).

Cuando se cumplen estas tres condiciones y se produce la completa licuefacción del sedimento,

se desencadena una reorganización del material con una sedimentación por gravedad. Una de las consecuencias es la disminución de la porosidad y la consiguiente compactación del suelo. El agua que ocupaba los poros intenta escapar, transformando el suelo en una especie de “arena movediza”, y en muchas ocasiones extruye en superficie arrastrando incluso las partículas detríticas más finas que forman volcanes de arena (Fig. 3). Para más información se recomienda consultar la figura 21 de Masana et al. (2011).

En ocasiones estos volcanes tienen unas dimensiones de decenas de metros, como los que todavía se pueden reconocer en el valle del Mississippi, en la zona sísmica de New Madrid. Steve Obermeier incluye en varios de sus trabajos algunas fotografías aéreas espectaculares que se pueden descargar en internet, utilizando como palabras clave en un buscador “liquefaction, New Madrid”, en el apartado de imágenes. En estas fotografías aéreas, se reconocen en los campos de cultivo algunas manchas más claras que corresponden a la arena licuefactada que llegó a extruir en superficie durante los terremotos de New Madrid de 1811-1812.

Animaciones sobre licuefacción sísmica

Son muchas las animaciones sobre licuefacción que se pueden encontrar en internet. Existen varias instituciones relacionadas con la sismología y la geología de los terremotos que incluyen en sus páginas web recursos educativos de gran interés. Entre estos organismos e instituciones destacamos la página web del Servicio Geológico de los Estados Unidos (<http://www.usgs.gov>), o la de IRIS “Incorporated Research Institutions for Seismology” (<http://www.iris.edu>).

Por ejemplo, IRIS tiene tres animaciones muy interesantes sobre la licuefacción sísmica en:

<http://www.iris.edu/hq/inclass/search#type=1>

También la Universidad de Washington tiene una web muy interesante dedicada a la licuefacción sísmica (<http://www.ce.washington.edu/~liquefaction/html/main.html>).

Videos sobre licuefacción sísmica

Uno de los primeros vídeos que registraron la licuefacción sísmica corresponde al terremoto de Niigata (Japón), de 1964. En youtube, utilizando las palabras clave “liquefaction” “Niigata”, es posible visionar un vídeo corto que, aunque tiene baja calidad, muestra claramente el proceso de licuefacción producido por este terremoto de magnitud 7.5 (<https://www.youtube.com/watch?v=EU66d1ytsbE>). La licuefacción sísmica de este terremoto provocó el hundimiento y basculamiento de varios edificios cuyas fotografías, de gran espectacularidad, ilustran este proceso en numerosos libros de texto. Más información de este terremoto se encuentra en la página web del USGS, en el apartado de terremotos históricos (búsqueda utilizando “Niigata earthquake” “USGS”: http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/world/events/1964_06_16.php). También se puede encontrar información de este terremoto en Wikipedia.

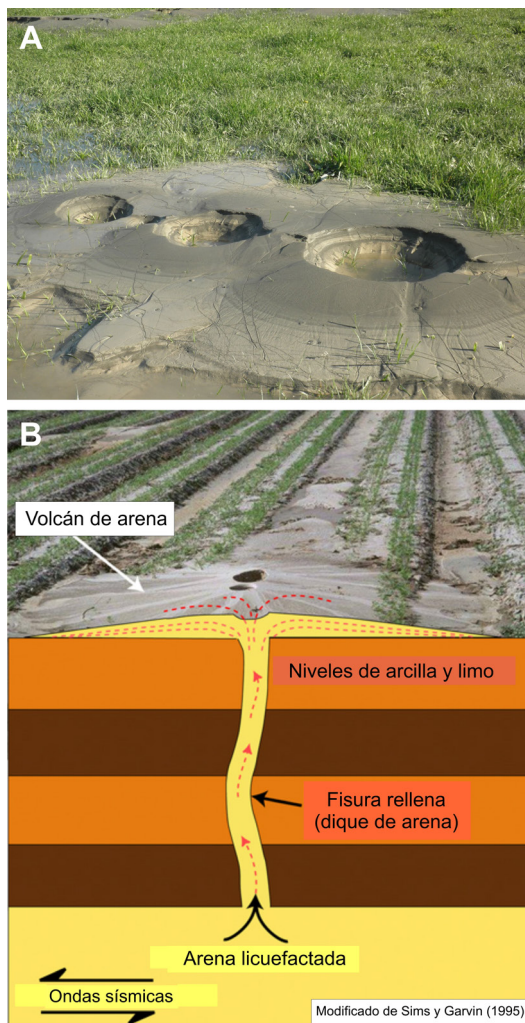


Fig. 3. A. Detalle de un grupo de volcanes de arena formados durante el terremoto de Christchurch (Nueva Zelanda) el 22 de febrero de 2011, con una magnitud 6.3. Obsérvese cómo se reconocen acanaladuras formadas por el flujo del agua al salir a la superficie. Fotografía cortesía de Caroline Hardwick (esta foto está tomada de Delgado, 2011). B. Esquema realizado por Sims y Garvin (1995) sobre la formación de un volcán de arena. Obsérvese cómo la capa de arena licuefactada está cubierta por varios niveles de arcilla y limo que actúan como una barrera de impermeabilidad.

Pero los recientes terremotos ocurridos en Italia, en Nueva Zelanda o en Japón, han proporcionado numerosas grabaciones en directo, de gran espectacularidad, de este curioso fenómeno. Delgado (2011) muestra una selección muy interesante de enlaces de youtube. A continuación ofrecemos algunos más que complementan los ofrecidos por Delgado (2011), como este impresionante vídeo del terremoto de Japón de 2011 (<http://www.youtube.com/watch?v=DlhHhadTqc>) o varios vídeos sobre el terremoto de Emilia Romagna (Italia) ocurrido en mayo de 2012: <http://www.youtube.com/watch?v=dla998s6zpU>, <http://www.youtube.com/watch?v=au6qdm9g22g> y <http://www.youtube.com/watch?v=rjsfZeYrcBM>.

De todas formas, la abundancia de teléfonos móviles, con millones de reporteros repartidos por el territorio, hará que este material gráfico sea extraordinariamente abundante durante los próximos terremotos, y que podamos acceder a ellos a través de internet utilizando algunas palabras clave como “liquefaction”, “seismic liquefaction”, el nombre del terremoto o alguna referencia geográfica a ese sismo (Japón, Nueva Zelanda, Emilia Romagna, Italia, ...).

Modelos análogos sobre licuefacción sísmica

En internet son frecuentes los modelos análogos de diferente grado de complejidad que reproducen el proceso de licuefacción sísmica. A continuación se ha realizado una pequeña selección priorizando los más sencillos para que puedan ser reproducibles con facilidad en el aula.

La mayoría de ellos hacen referencia al hundimiento o basculamiento de edificios cuando se produce la licuefacción. Este experimento, muy simple y que ha sido ampliamente reproducido en internet (también en youtube, por ejemplo en http://www.youtube.com/watch?v=_r7WbKLDnYU), representa cómo un edificio se hunde en una arena que ha sufrido licuefacción cuando ésta pierde su resistencia.

Por ejemplo, en el enlace <http://www.exploratorium.edu/faultline/activezone/liquefaction.html> se explica detalladamente el experimento y los materiales necesarios para llevarlo a cabo.

Un experimento similar, aunque con algo más de desarrollo didáctico, se puede encontrar en la página web de NEES (Network for Earthquake Engineering Simulation): <http://nees.org/resources/2942>.

En todos estos experimentos el alumnado observa y comprende que cuando un sedimento licuefacta, se transforma en un líquido viscoso que pierde su resistencia, y los objetos más densos que hay en superficie (p.ej. edificios) se hunden.

Cy Ashley Webb ofrece una actividad en el portal www.education.com, en la que los estudiantes pueden comprobar que la licuefacción es diferente en función del tipo de suelo. Se recomienda la actividad “Exploring Where to Build in Earthquake Country: A Study of Liquefaction in Sand, Rock, and Soil”

<http://www.education.com/science-fair/article/stable-building-earthquake-country/>

ESTRUCTURAS SEDIMENTARIAS DE DEFORMACIÓN (“SISMITAS”)

Una de las estructuras sedimentarias que más llaman la atención a los científicos y a los estudiantes son las producidas por la deformación del sedimento cuando éste está poco o nada consolidado. La deformación suele ocurrir con gran rapidez, cerca de la superficie, durante o inmediatamente después del depósito, y antes de que se produzca una diagénesis significativa. En general, estas estructuras de deformación pueden ocurrir en sedimentos cohesivos y no cohesivos, cuando las propiedades físicas de los mismos son muy diferentes a las de las rocas.

En este artículo nos centramos en las estructuras sedimentarias de deformación de origen sísmico. Para este tipo de estructuras, Seilacher (1969) acuñó el término **sismita**, que ha tenido una gran repercusión en la literatura científica.

Es necesario advertir al alumnado que para deformar el sedimento no basta con que ocurra un terremoto. Además del terremoto (**proceso geológico**), es necesario que éste desencadene algún **mecanismo de deformación** como puede ser la licuefacción. Y aun así tampoco sería suficiente ya que el sedimento tendría, además, que tener alguna **fuerza motriz** capaz de deformarlo (Fig. 4). ¿Por qué debe tener una fuerza motriz? Si el sedimento es homogéneo y sufre licuefacción, el único resultado es que se compacta, sin deformación aparente (Fig. 5A). Sin embargo, si existe una fuerza motriz como una ligera pendiente, el sedimento licuefactado va a deslizar a favor de pendiente deformándose, o si existe un gradiente de densidad invertido (una capa más densa sobre una capa menos densa), si el sedimento licuefacta va a “disparar” el movimiento gravitacional de ambas capas, de manera que el sedimento infrayacente menos denso va a desplazarse hacia

Fig. 4. La ocurrencia de un terremoto (proceso geológico) no es suficiente para deformar el sedimento. Es necesario que el sismo desencadene un mecanismo de deformación (p.ej. licuefacción) y, además, que exista una fuerza motriz (en este ejemplo existe un gradiente de densidad invertido).

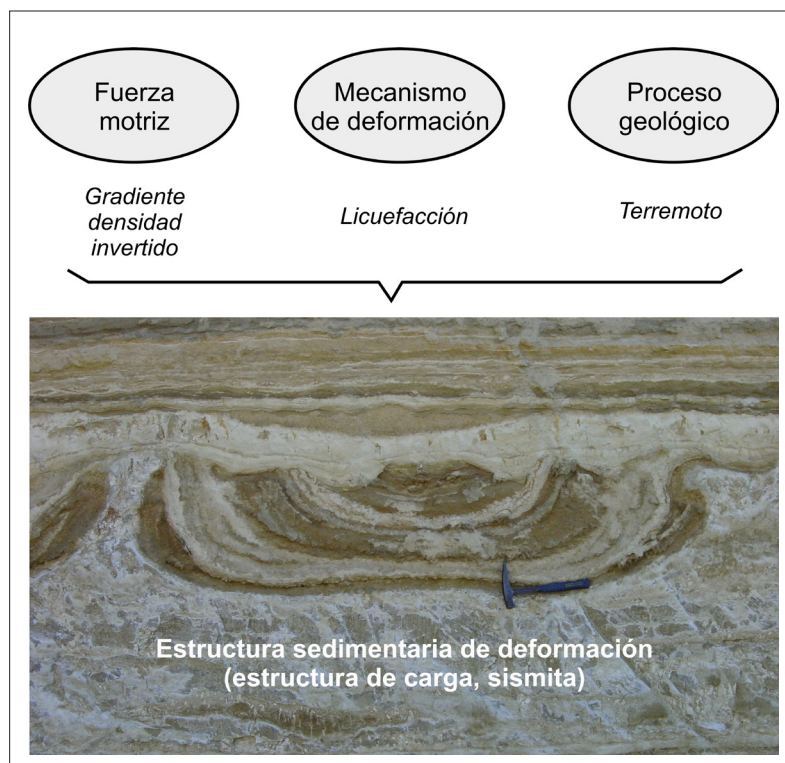
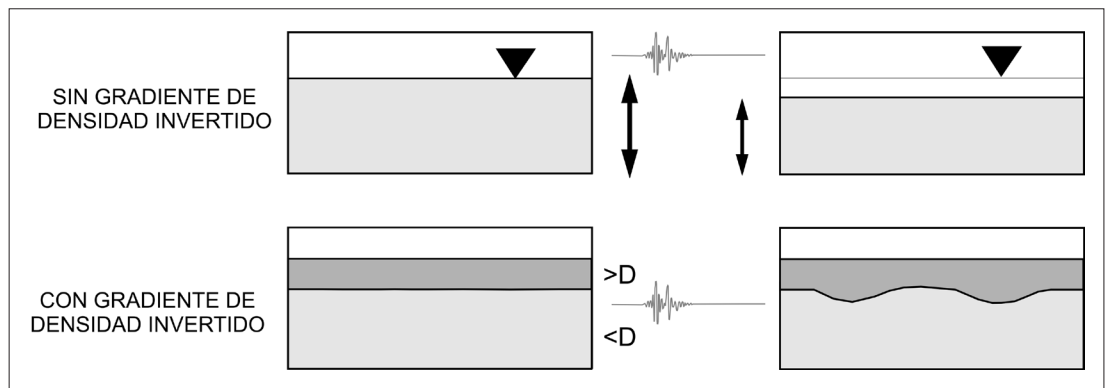


Fig. 5. Esquemas del comportamiento de un sedimento detrítico arenoso saturado en agua después de un terremoto simulado (ej. agitando el recipiente). A. Si el sedimento es homogéneo (p.ej. idéntica granulometría), se va a producir licuefacción, se va a compactar y el agua va a migrar hacia la superficie, pero finalmente no se observará ninguna deformación aparente. B. Si el sedimento tiene un gradiente de densidad invertido, esta fuerza motriz será capaz de deformar el sedimento. Cuando se produce la licuefacción, el sedimento pierde su resistencia y el más denso tiende a migrar hacia la parte inferior mientras que el menos denso lo hace hacia la parte superior.



arriba (como ocurre en un proceso diapírico pero a una velocidad mucho mayor) y el suprayacente más denso lo va a hacer hacia abajo. El resultado son las estructuras sedimentarias de deformación (Fig. 5B).

En definitiva, existen grandes volúmenes de sedimentos que han sufrido terremotos y que no tienen ninguna deformación aparente porque en ese momento o bien no se desencadenó ningún mecanismo de deformación (p.ej. licuefacción) o bien no existía ninguna fuerza motriz (p.ej. un gradiente de densidad invertido). Por tanto, para que se forme una estructura sedimentaria de deformación (sismita) como la que aparece en la figura 4 es necesario: (1) un proceso geológico (terremoto), (2) un mecanismo de deformación (licuefacción) y (3) una fuerza motriz (gradiente de densidad invertido).

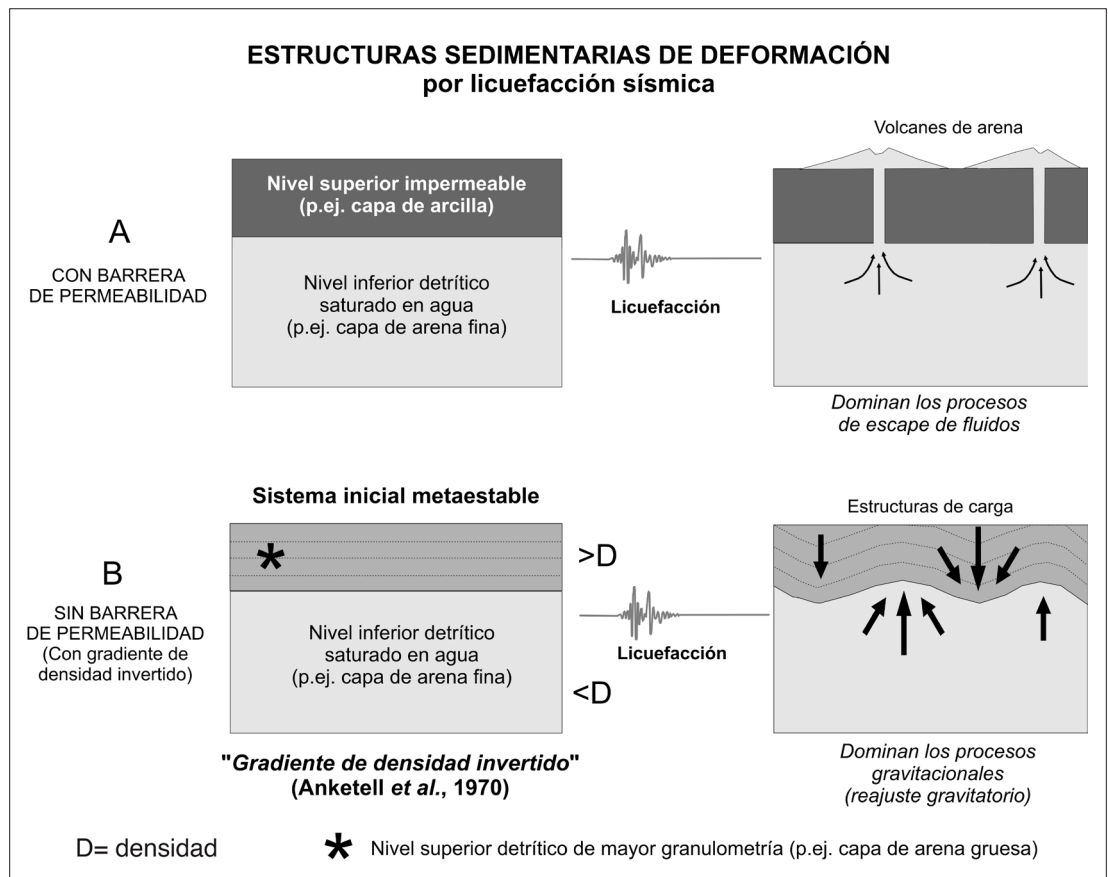
Otra posible reflexión que se puede plantear al alumado es que los terremotos no son el único proceso geológico capaz de licuefactar el sedimento. Otros fenómenos como el oleaje, las inundacio-

nes, la sedimentación brusca o el flujo de agua subterránea pueden incrementar la presión intersticial de fluidos hasta licuefactar el sedimento. Por tanto, para poder interpretar el origen sísmico de estas estructuras los científicos tienen que descartar previamente el resto de procesos geológicos, y no siempre es posible.

UN EJEMPLO MUY ABUNDANTE DE SISMITAS: LAS ESTRUCTURAS DE CARGA

Las estructuras de licuefacción son muy diferentes si el sedimento tiene o no una barrera de permeabilidad (Fig. 6). Si existen estas barreras (p.ej. capas de arcilla o limos muy finos) el sedimento que licuefacta se forman habitualmente volcanes de arena (Figs. 3 y 6A). Estos edificios de arena se erosionan con gran facilidad por lo que, salvo rarísimas excepciones, es muy difícil que se preserven en

Fig. 6. La huella de la licuefacción sísmica en el registro geológico es muy diferente si existen, o no, barreras de permeabilidad. A. Cuando sobre el sedimento arenoso detrítico existe una capa de arcilla o de limo muy fino que actúa como impermeable, se incrementa considerablemente la presión intersticial. En ocasiones, el sedimento fluidificado escapa por zonas de debilidad produciendo en superficie volcanes de arena (ver Fig. 3). B. Si no existen barreras de permeabilidad, se produce una migración en la vertical del sedimento de forma que el más denso se hunde y el menos denso migra hacia la superficie, formando estructuras de carga.



el registro estratigráfico. Sin embargo, lo que es mucho más fácil de reconocer en el registro geológico es la parte más profunda de estos volcanes, es decir, los conductos de alimentación o de licuefacción, que pueden ser conductos lineales (chimeneas) o conductos planares (diques), cuando la inyección se produce por ejemplo a favor de fracturas.

Si por el contrario no existen estas barreras de permeabilidad (Fig. 6B) se forman unas estructuras sedimentarias de deformación que pasan desapercibidas en los terremotos recientes (porque sólo se pueden observar en sección y muchas de ellas ocurren bajo una lámina de agua), llamadas **estructuras de carga**. En el registro sedimentario es muy frecuente la existencia de inestabilidades gravitacionales cuando unidades superiores de mayor densidad se depositan sobre unidades inferiores de menor densidad. Estas unidades pueden ser simples o multicapa. Esto ocurre cuando una capa de mayor granulometría (más densa) se apoya sobre otra de granulometría más fina (menos densa).

En estas situaciones inestables del sedimento (una capa más densa apoyada sobre otra menos densa), si no se produce ninguna perturbación, el sedimento se transforma en roca sedimentaria sin deformarse. Por el contrario, cuando estas unidades con inestabilidad gravitacional están en la superficie o cerca de ella, si se produce la licuefacción del sedimento, la primera consecuencia es que éste pierde su resistencia y se transforma en una especie de líquido viscoso. En estas condiciones, si existe una inestabilidad gravitacional, la unidad superior más densa se hunde mientras que la unidad inferior menos densa tiende a ascender. Este movimiento produce la deformación del sedimento y genera lo que se denominan estructuras de carga. Dependiendo de la naturaleza del sedimento y del tiempo de deformación se producen diferentes morfologías; las más habituales se han representado en la figura 7.

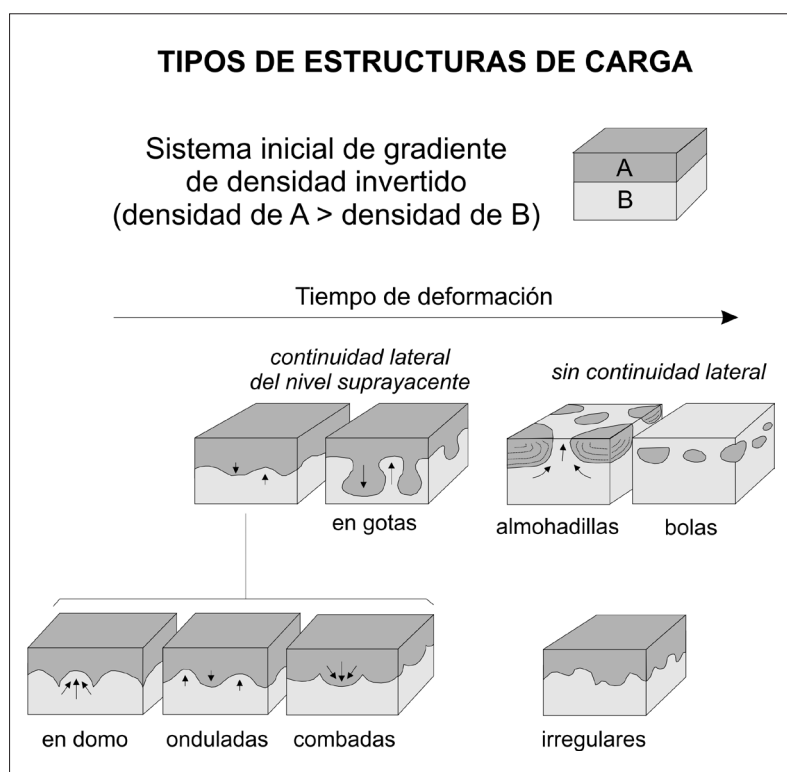
Tal y como se ha comentado anteriormente, son varios los procesos geológicos capaces de producir la licuefacción del sedimento y, por tanto, estas estructuras de carga. Cuando son generadas por terremotos reciben el nombre de sismitas.

Sims (1973) describió estas estructuras sedimentarias de deformación en el relleno del embalse Van Norman (California), que interpretó como resultado de terremotos recientes. También han sido reproducidas experimentalmente en numerosos trabajos científicos (ver p.ej. Owen, 1992, 1996; Moretti et al., 1999).

MODELOS ANÁLOGOS

Se han realizado numerosos trabajos científicos sobre modelización de estructuras sedimentarias de deformación, por la licuefacción del sedimento (ver p.ej. Owen, 1992, 1996). Moretti et al. (1999) reproducen algunas de estas estructuras con un simulador digital de terremotos.

En este trabajo se ofrecen varias experiencias muy sencillas para que los estudiantes comprendan cómo los terremotos producen licuefacción y deforman el sedimento reproduciendo estructuras de carga o volcanes de arena.



Experimento 1. Gradiente de densidad invertido

Antes de reproducir con modelos análogos sencillos las estructuras de carga, es recomendable realizar alguna experiencia previa sencilla que ayude al alumnado a comprender por qué se deforma el sedimento, a conocer cuál es la fuerza motriz capaz de generar estas estructuras. A continuación se exponen varias experiencias sencillas a modo de ejemplo pero se pueden reproducir con materiales muy diferentes.

Objetivo: mostrar cómo el gradiente de densidad invertido es la fuerza motriz que deforma el sedimento durante una sacudida sísmica.

Materiales: se necesita un recipiente y materiales de diferente densidad. Por ejemplo, en nuestra experiencia hemos utilizado tornillos u otros objetos metálicos densos, lentejas como material de densidad intermedia y pelotas de ping-pong que representan el material de baja densidad.

Experiencia 1: el recipiente se rellena de lentejas, se entierran una o varias pelotas de ping-pong y se sitúa sobre la superficie uno o varios objetos más densos (p.ej. tornillos). Con una maza o directamente con la mano se agita el recipiente simulando una sacudida sísmica (Figs. 8 y 9).

Experiencia 2: se hace un agujero en varias pelotas de ping-pong que se rellenan con materiales de diferente densidad. Estas pelotas se entierran en el recipiente de lentejas y se agita simulando un terremoto (Fig. 10).

Experiencia 3: una actividad similar a las experiencias 1 y 2 se puede llevar a cabo sustituyendo las lentejas por arena y saturándola en agua para reproducir, de forma simultánea, el proceso de licuefacción. En este caso se podrá observar también cómo el agua asciende hacia la superficie.

Experiencia 4: se recomienda hacer un experimento únicamente con el material de densidad

Fig. 7. Algunos de los principales tipos de estructuras de carga. En la fila superior de esquemas se muestra la influencia del tiempo de deformación en la morfología de las estructuras.



Fig. 8. Experimento sencillo para reconocer cómo durante la agitación del sedimento, si existe un gradiente de densidad invertido, se produce la migración vertical del material. Se han utilizado tres materiales: (1) objetos metálicos de densidad mayor, (2) lentejas de densidad intermedia y (3) pelotas de ping-pong de densidad más baja. Antes de agitar, los objetos metálicos se han situado en la superficie de las lentejas y las pelotas de ping-pong se han enterrado en ellas. En la fotografía inferior derecha (DESPUÉS) se observa la situación después de agitar (terremoto).

Fig. 9. Esquema de lo que ocurre en el experimento de la figura 8. En la parte superior se ha representado una experiencia sin gradiente de densidad invertido (únicamente con lentejas). En este caso se puede comprobar que sólo se produce una compactación sin deformación aparente (ver Figs. 5A y 11).

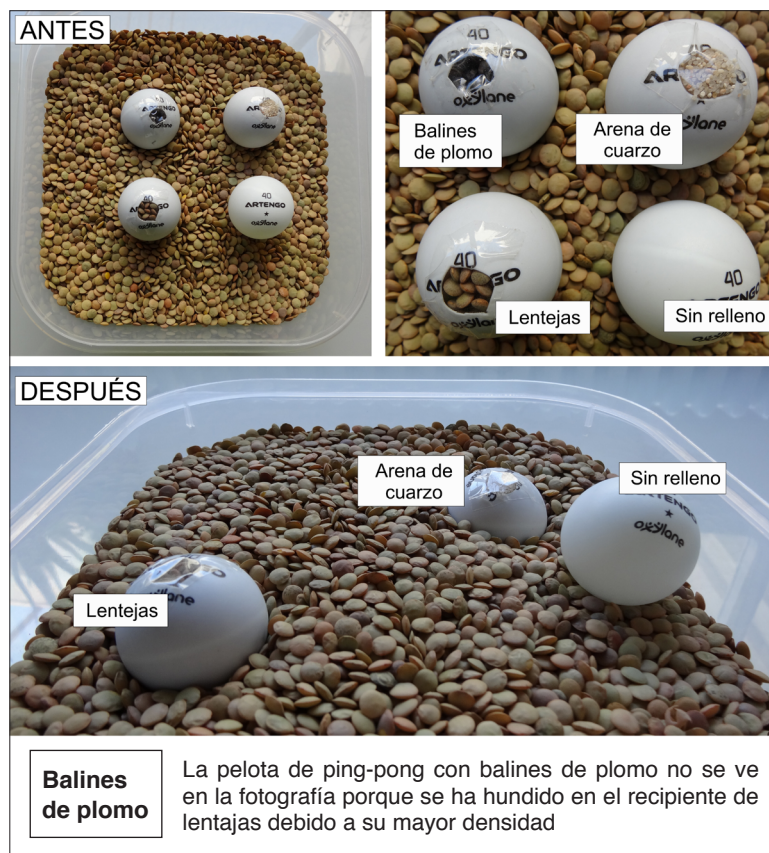
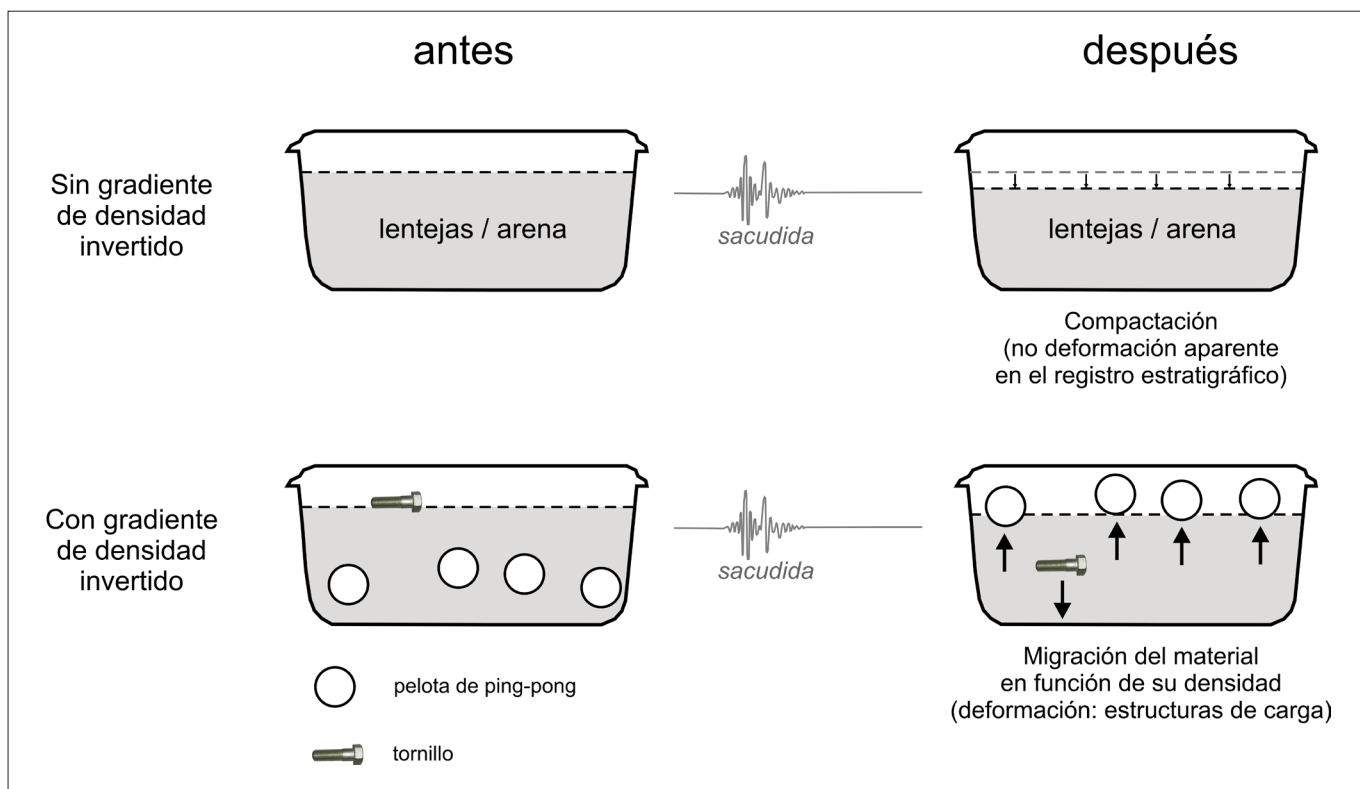


Fig. 10. La deformación del sedimento depende de muchos factores como, por ejemplo, la duración del terremoto, pero también depende de las características del sedimento. Por ejemplo, cómo influye el contraste de densidad de los sedimentos implicados se puede modelar variando la densidad de las pelotas de ping-pong (en este caso se ha utilizado una vacía y otras tres rellenas de lentejas, arena de cuarzo y balines de plomo). Después de agitar se observa cómo este contraste de densidad influye en la cantidad de movimiento vertical (está relacionado con la intensidad de la deformación).





ANTES



DESPUÉS

Fig. 11. Una experiencia muy sencilla se puede realizar rellenando una probeta graduada con arena o con cualquier “elemento detrítico” (en el ejemplo se han utilizado lentejas). Se puede comprobar cómo después de agitar se produce una reorganización y una compactación (ver Figs. 5 y 9).

intermedia (arena o, por ejemplo, lentejas). En este caso, al no existir materiales de mayor y menor densidad, el material sólo se compactará un poco por la sacudida, disminuyendo su porosidad, pero no se reconocerá ninguna deformación interna (Fig. 11). Algo parecido ocurre en la naturaleza cuando el sedimento original es homogéneo y en él no hay ninguna fuerza motriz (*driving force*) (Fig. 5). En estos casos, es muy difícil o imposible de reconocer en el registro geológico la existencia de terremotos que han licuefactado el sedimento.



B)

Experimento 2. Creando sismitas (estructuras de carga)

Tal y como se ha comentado anteriormente, las estructuras de deformación producidas por licuefacción sísmica han sido modelizadas por varios autores. En internet existen algunos vídeos que permiten observar cómo se producen algunas de estas estructuras de deformación (p.ej. <https://www.youtube.com/watch?v=r5B55RELfTo>).

Objetivo: mostrar cómo se forman estructuras de carga cuando se produce licuefacción en un sedimento con un gradiente de densidad invertido.

Materiales: se necesita un recipiente y dos materiales de diferente densidad. Por ejemplo, se puede utilizar arena gruesa y una arena muy fina o limo. Es recomendable que tengan un color diferente. Una forma de obtener el material más fino es tamizando alguna arena mal seleccionada separando la fracción más fina.

Experiencia: se rellena el recipiente con el sedimento más fino que debe estar saturado en agua. Sobre él se deposita una capa más fina de un material más denso (p.ej. mayor granulometría). Con una maza o directamente con la mano se agita el recipiente simulando una sacudida sísmica (Figs. 12 y 13).

Se recomienda hacer el mismo experimento con uno de los materiales, sin que haya gradiente de densidad invertido.

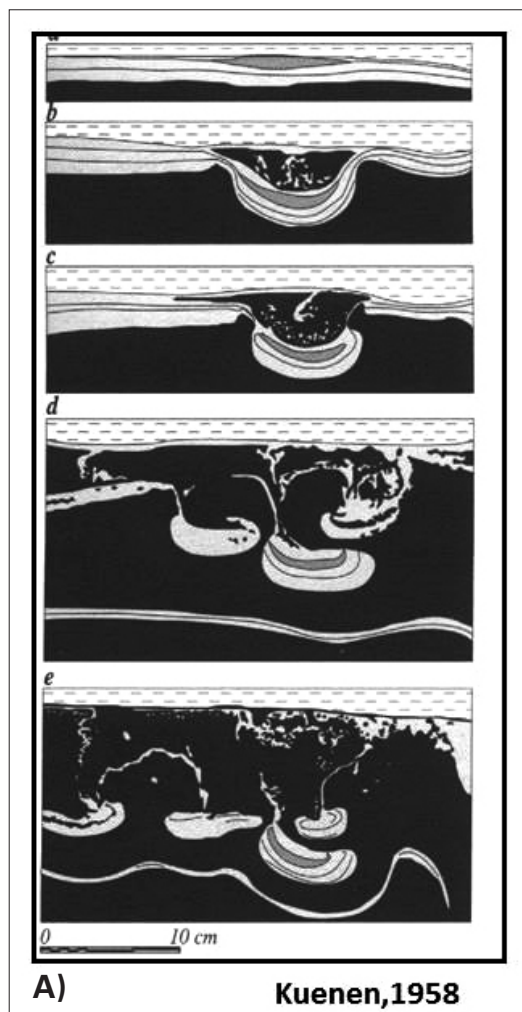
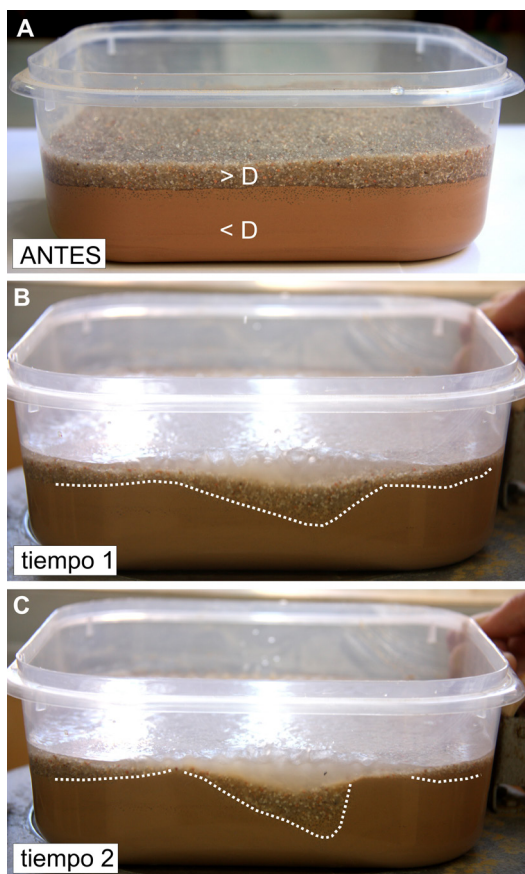


Fig. 12. A. Experimento realizado por Kuenen (1958) para modelizar las estructuras de carga de una capa arenosa sobre un nivel infrayacente de lodo arcilloso. B. Experiencia realizada con una capa de arena sobre una capa de lodo arcilloso y agitada en un simulador digital de terremotos (Moretti et al., 1997).

Fig. 13. El experimento clásico de Kuenen (1958) se puede reproducir de forma sencilla con una fiambarrera (tupper ware) y dos materiales detríticos de diferente densidad. Se recomienda utilizar un sedimento muy fino para el nivel inferior. Cuando se agita sucesivamente se generan estructuras de carga con una deformación cada vez más intensa en el tiempo.



Experimento 3. Creando volcanes de arena

Para reproducir volcanes de arena es necesario añadir una capa impermeable en la parte superior (barrera de permeabilidad) que aumente la presión intersticial de la capa infrayacente. En la naturaleza esta capa impermeable suele ser habitualmente de arcilla o limo muy fino.

Objetivo: mostrar cómo se forman volcanes de arena.

Fig. 14. Experimento para reproducir volcanes de arena. En una fiambarrera (tupper ware) se ha vertido arena muy fina completamente saturada en agua. Sobre ella se ha colocado una capa de plastilina de aproximadamente medio centímetro de espesor. Antes de agitar, se ha roto la capa de plastilina en dos lugares, en uno de forma puntual y en otro lineal (simulando una fractura). Estas roturas facilitan la expulsión de agua y arena. Los plomos de pescar que aparecen en la fotografía son para evitar que el agua “levante” la plastilina separándola de la arena. De esta manera, el agua termina por llegar a la superficie arrastrando arena y formando pequeños volcanes, similares a los que ocurren durante terremotos reales.



Materiales: se necesita un recipiente, arena fina que se satura en agua y una capa impermeable (hemos utilizado una capa de medio centímetro de plastilina). No debe quedar apenas hueco entre el borde del recipiente y la plastilina porque si no escapará la arena y el agua por ahí (es necesario ajustarlo al máximo). Para evitar que el agua que asciende empuje a la plastilina hacia arriba y la separe de la arena hay que colocar algunos pesos (hemos utilizado plomos de pesca) (Fig. 14).

Experiencia: Antes de agitar, simulando la sacudida sísmica, realizamos en la plastilina un agujero y una ranura lineal (p.ej. con un cúter o un cuchillo). Representan en la naturaleza zonas de debilidad del suelo por dónde va a escapar el agua y la arena licuefactada. Después del “terremoto” el agua escapa hacia la superficie inundándola y arrastrando arena que forma un volcán de arena alineado a lo largo de la fisura, muy similares a los que se observan en la naturaleza (p.ej. Fig. 3).

CONSIDERACIONES FINALES

La utilización de las sismitas (registro estratigráfico de los terremotos) como herramienta didáctica tiene un gran potencial. Cada vez son más numerosas las grabaciones del fenómeno de la licuefacción durante terremotos recientes (y es de prever un aumento espectacular en los próximos años), así como las animaciones, modelos análogos y experimentos. Estos recursos permiten al alumnado aplicar, de forma sencilla, el principio del actualismo, y a comprender que las características de los sedimentos que observamos en el registro geológico no son únicamente el resultado del ambiente sedimentario en el que se depositaron. Fenómenos externos a los ambientes de depósito, como es el caso de los terremotos, son capaces de quedar registrados en los sedimentos, generando estructuras sedimentarias de deformación denominadas sismitas.

AGRADECIMIENTOS

Queremos mostrar nuestro agradecimiento a Antonio Belda Antolí por su colaboración y sus sugerencias para mejorar los modelos análogos.

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto del Ministerio de Ciencia e Innovación del Gobierno de España CGL2011-30153-Co2-02.

BIBLIOGRAFÍA

- Alfaro, P., Gibert, L., Moretti, M., García-Tortosa, F.J., Sanz de Galdeano, C., Galindo-Zaldívar, J. y López-Garrido, A.C. (2010). The significance of giant seismites in the Plio-Pleistocene Baza paleo-lake (S Spain). *Terra Nova*, 22, 172-179.
- Allen, J.R.L. (1982). *Sedimentary structures: their character and physical basis*. Elsevier, Amsterdam.
- Delgado, J. (2011). Efectos geotécnicos de los terremotos. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 19.3, 276-288.
- Ettensohn, F.R., Rast, N. y Brett, C.E. (Eds.) (2002). *Ancient seismites*. Geological Society of America, Special Paper, 359.
- Jones, M.E. y Preston, R.M.F. (Eds.) (1987). *Deformation of sediments and sedimentary rocks*. Geological Society, London, Special Publication, 29.
- Maltman, A.J. (1994). *The geological deformation of sediments*. Chapman and Hall, London.
- Masana, E., Rodríguez-Pascua, M.A. y Martínez-Díaz, J.J. (2011). Los paleoterremotos: estudiando el pasado para entender el futuro. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 19.3, 305-316.
- McCalpin, J. (2009). *Paleoseismology*. Academic Press, segunda edición, 848 p. ISBN: 9780123735768.
- Moretti, M., Alfaro, P., Caselles, O. y Canas, J.A. (1999). Modelling seismites with a digital shaking table. *Tectonophysics*, 304, 369-383.
- Obermeier, S.F. (1996). Use of liquefaction-induced features for paleoseismic analysis – an overview of how seismic liquefaction features can be distinguished from other features and how their regional distribution and properties of source sediment can be used to infer the location and strength of Holocene paleo-earthquakes. *Engineering Geology*, 44, 1-76.
- Owen, G. (1992). A shaking table for experiments on soft-sediment deformation. *Journal of Sedimentary Petrology*, 62.4, 733-734.
- Owen, G. (1996). Experimental soft-sediment deformation: structures formed by the liquefaction of unconsolidated sands and some ancient examples. *Sedimentology*, 43, 279-293.
- Owen, G., Moretti, M. y Alfaro, P. (2011). *Recognising triggers for soft-sediment deformation: Current understanding and future directions*. Número especial de *Sedimentary Geology*, 235, 3-4, 342 p.
- Seed, H.B. e Idriss, I.M. (1971). A simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *ASCE Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 97.9, 1249-1273.
- Seilacher, A. (1969). Fault-graded beds interpreted as seismites. *Sedimentology*, 13, 155-159.
- Sims, J.D. (1973). Earthquake-induced structures in sediments of Van Norman Lake, San Fernando, California. *Science*, 182, 161-163.
- Sims, J.D. y Garvin, C.D. (1995). Recurrent liquefaction at Soda Lake, California, induced by the 1989 Loma Prieta earthquake, and 1990 and 1991 aftershocks: Implications for paleoseismicity studies. *Seismological Society of America Bulletin*, 85, 51-65. ■

Este artículo fue solicitado desde E.C.T. el día 3 de noviembre de 2014 y aceptado definitivamente para su publicación el 12 de mayo de 2015.