

LA GEOLOGÍA ES NOTICIA

PROYECTO CASTOR

Álvaro González

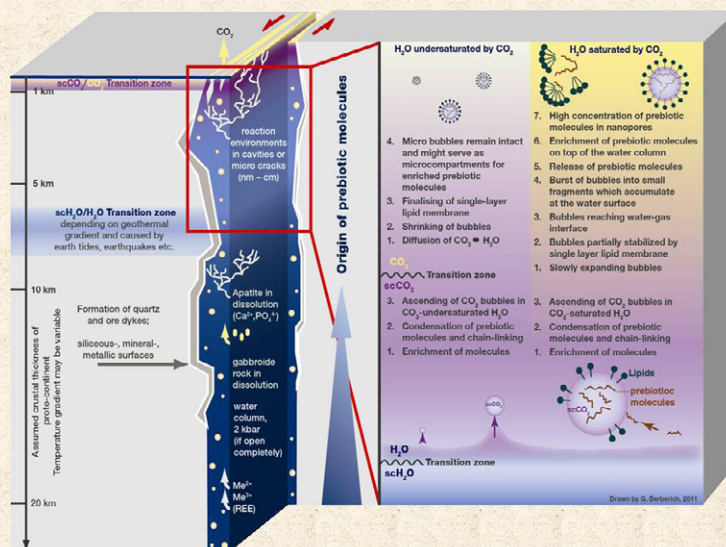
(pag. 298)

Relación de la secuencia sísmica con la inyección de gas



DIVERSAS HIPÓTESIS

El origen de la vida en la corteza terrestre



Ulrich Schreiber, Christian Mayer y María J. Dávila

(pag. 303)

PROYECTO CASTOR

Relación de la secuencia sísmica con la inyección de gas

ÁLVARO GONZÁLEZ

*Departamento de Ciencias de la Tierra,
Universidad de Zaragoza.
Alvaro.Gonzalez@unizar.es*

Una secuencia sísmica, que culminó en terremotos de magnitud hasta 4.3 (Cesca *et al.*, 2013; 4.2 según IGN, 2015), se originó en septiembre y octubre de 2013 frente a las costas

de Castellón, cerca de donde se estaba inyectando subterráneamente gas natural para almacenarlo en un yacimiento petrolífero agotado (Fig. 1). Los mayores terremotos fueron sentidos en las poblaciones cercanas, lo que causó gran alarma social y mediática, y motivó que en ellas se activasen de manera preventiva los planes especiales de Protección Civil ante el riesgo sísmico. El proyecto de inyección fue detenido por orden

gubernamental, y su tramitación administrativa y sus operaciones se están investigando judicialmente. Se prevé que su coste, originalmente 1350 millones de euros, pero más de 4700 millones contando los intereses de financiación, sea pagado a plazos por los consumidores de gas natural durante los próximos treinta años (OCU, 2014). Rara vez una serie de terremotos, aun sin haber causado daños materiales directos, conlleva



Fig. 1: Vista aérea, mirando hacia el noroeste, de las plataformas del Proyecto Castor (cortesía de Tjerk van der Meulen). Están situadas a 21 km de la costa y construidas sobre el fondo marino, a 60 m de profundidad. La mayor alberga instalaciones de procesos, y la menor es de donde parten los sondeos. Las sierras montañosas al fondo, paralelas a la costa, muestran la impronta estructural de fallas normales con esa dirección. Las principales fallas submarinas conocidas en el entorno tienen una dirección similar.

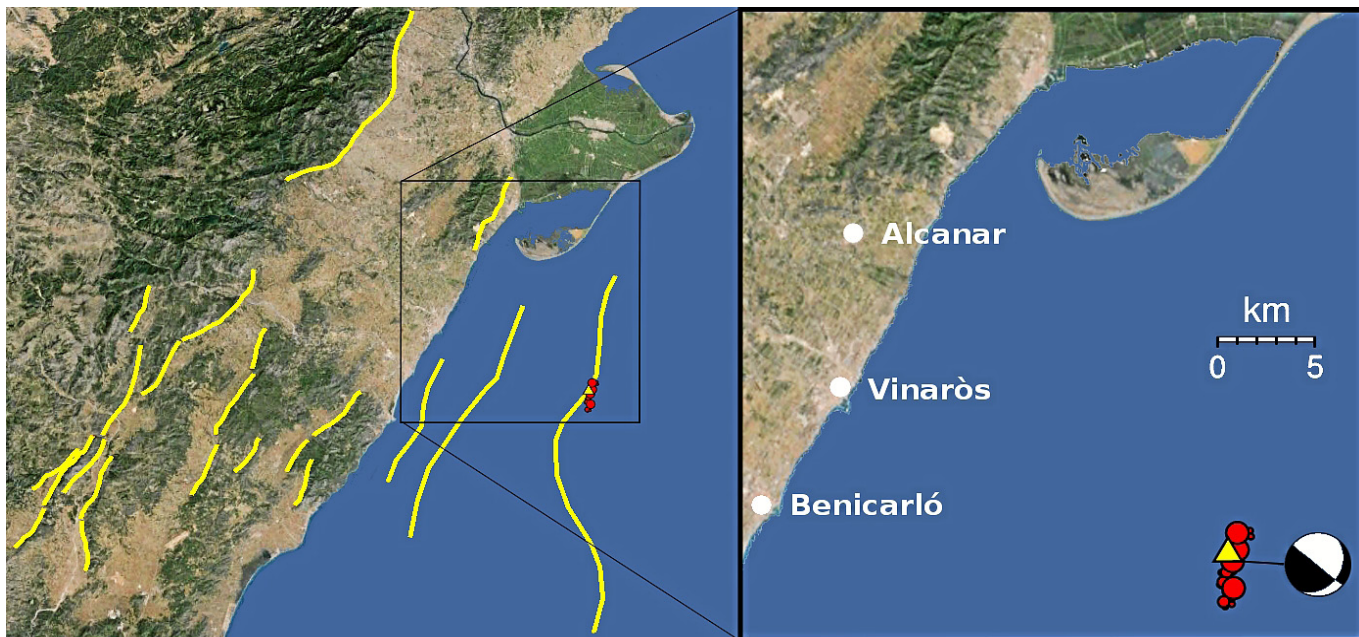


Fig. 2.- Contexto sismotectónico de la secuencia. En amarillo, trazas de fallas activas durante el Cuaternario de la base de datos QAFI (IGME, 2012). Un triángulo marca la plataforma Castor. Los epicentros de los 51 terremotos localizados con mayor precisión se representan en rojo (ver edición digital). Estos se basan en la mejor localización absoluta del terremoto máximo (de magnitud 4.3, y cuyo mecanismo focal se indica), y las localizaciones relativas de los demás en torno a él (Cesca *et al.*, 2014). Véanse en ese artículo los mecanismos focales de otros terremotos de la secuencia y su comparación con los calculados por el IGN.

tantas repercusiones. Este artículo trata de analizarla desde el punto de vista tectónico y sismológico.

El lugar de inyección se enclava frente a las localidades de Vinaròs y Benicarló, al sur del Delta del Ebro, en la plataforma continental (Fig. 2). Geológicamente se encuentra en el Surco de Valencia, la cuenca orientada NE-SO entre la Península Ibérica y las Islas Baleares, que constituye la parte más meridional del sistema de *rifts* que cruza Europa Occidental. Este surco se ha estado formando desde hace unos 28 millones de años, principalmente por fallas normales aproximadamente paralelas a la costa peninsular, tanto en tierra como submarinas (Perea *et al.*, 2012, y referencias ahí citadas). Localmente la dirección de máxima compresión actual es NNE-SSO, lo que favorece que algunas de esas fallas se comporten como desgarres.

Diversas fallas del Surco de Valencia, y en concreto varias próximas al lugar de inyección, han estado activas durante el Cuaternario (Fig. 2). Las fallas submarinas situadas justo al sur del Delta del Ebro configuran la llamada Fosa de Amposta. La principal de ellas es la Falla Oriental de

Amposta que, con una longitud estimada de 51 km (Perea *et al.*, 2012), afecta a materiales sedimentarios desde mesozoicos a cuaternarios y tiene un salto total superior a un kilómetro (Seeman *et al.*, 1990). Llega casi a cortar el fondo marino actual, lo que indica una actividad reciente, y de hecho antes de 2013 ya se habían detectado algunos terremotos naturales (de magnitudes inferiores a 3.5) posiblemente causados por esta falla (Perea *et al.*, 2012). A partir de sus dimensiones, se ha calculado que podría generar terremotos de magnitud máxima en torno a 7; estos ocurrirían en promedio cada varias decenas de miles de años, dada la tasa media de desplazamiento de la falla, del orden de una décima de milímetro por año (Perea *et al.*, 2012).

Antes de 2013, los terremotos más intensos sentidos en las inmediaciones (según datos del Instituto Geográfico Nacional: IGN, 2015), se originaron en las proximidades de Alcanar (en la costa, prácticamente frente al lugar de inyección, en 1879 – Fig. 2) y Tortosa (junto al Delta del Ebro, en 1939). Ambos tuvieron una intensidad máxima de V (fuertes, ampliamente sentidos y capaces

de causar daños en construcciones muy vulnerables). La peligrosidad sísmica calculada en las poblaciones del entorno es relativamente baja (Martínez Solares *et al.*, 2013), principalmente por la escasa frecuencia de terremotos allí conocidos desde que existen informaciones históricas y registros instrumentales.

La Falla Oriental de Amposta constituye la trampa estructural del yacimiento petrolífero de Amposta, explotado entre 1973 y 1989 (Seeman *et al.*, 1990, Barat Vinacua, 2011). Las rocas almacén son calizas del Cretácico inferior que durante el Paleógeno estuvieron emergidas, se fracturaron y karstificaron. En ellas, el petróleo se encuentra principalmente en fracturas y conductos kársticos con elevada permeabilidad, mientras que el resto de la roca es poco porosa. Están cubiertas por unos 1700 m de materiales sedimentarios miocenos, pliocenos y cuaternarios que hacen de sello impermeable (Fig. 3). La falla, que buza hacia la costa (oeste), delimita un semi-graben y pone lateralmente en contacto un horst de esas calizas cretácicas con los sedimentos terciarios impermeables, cerrando el paso lateral al petróleo (Fig. 3). Éste se encontraba, por su menor densidad, encima de un acuífero. Conforme se fue extrayendo, el agua fue subiendo ocupando su espacio, lo que facilita la extracción y se conoce como *em-*

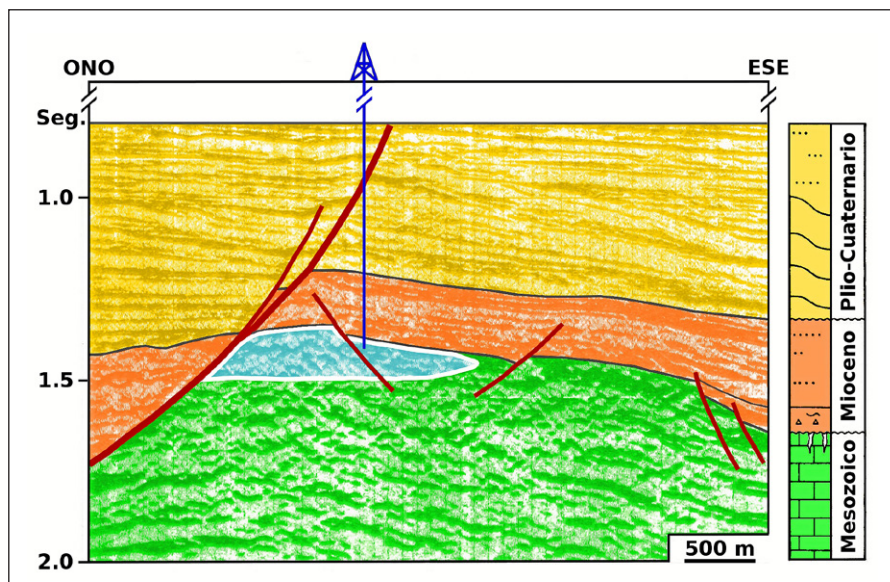


Fig. 3.- Corte geológico simplificado del yacimiento de Amposta, interpretado sobre un perfil de sísmica de reflexión (adaptado de Seeman et al., 1990). La escala vertical está en segundos de ida y vuelta de las ondas sísmicas, no en distancia real. La posición de la plataforma de inyección está proyectada (el sondeo de inyección, en azul, está en realidad justo al este de la Falla Oriental de Amposta, que se representa en trazo más grueso). En azul claro se esquematiza el almacén de gas, en calizas mesozoicas.

puje hidrostático (water drive).

Con el tiempo, y tras renunciar a la extracción del petróleo remanente en el yacimiento, se propuso usarlo exclusivamente como un almacén subterráneo de gas natural, el llamado Proyecto Castor (Barat Vinacua, 2011). El almacén se situaría estratégicamente próximo a centros industriales que eran grandes consumidores de gas natural, y también cercano a la red de gaseoductos ya existente. España importa casi todo el gas natural. Varios almacenamientos, tanto en superficie (en contenedores de gas líquido) como subterráneos, se mantienen como reservas estratégicas, destinadas a cubrir la demanda en caso de un corte temporal de suministro. El Proyecto Castor planeaba aumentar notablemente tales reservas. Con él también se negociaría en ciclos anuales, comprando y almacenando el gas en primavera-verano, cuando es más barato, y extrayéndolo y revendiéndolo a la red gasista en otoño-invierno, cuando es más caro por la mayor demanda para calefacción.

Las instalaciones del proyecto, finalizadas en 2013, incluyen una planta de operaciones en tierra, en Vinaròs, donde el gas, tomado desde la red de distribución, se comprimiría para bombearlo hacia el almacén (y donde

también más tarde se purificaría el gas bombeado de vuelta). De ahí, un gaseoducto, parte terrestre y parte submarino, conecta con las plataformas marinas (Fig. 1). El gas, al inyectarse en la roca almacén, reemplazaría al petróleo y agua en ésta, empujándolos hacia abajo a modo de un pistón.

Las primeras inyecciones se realizaron en varias etapas, a unos 1750 metros de profundidad bajo el nivel del mar. Correspondían a parte del gas *colchón*: el volumen de gas que quedaría permanentemente en el almacén, para darle la presión mínima adecuada para poder mantener más adelante el caudal deseado de extracción de gas. Una vez inyectado, este volumen inicial es difícil o imposible de recuperar. Las primeras etapas, en junio y agosto de 2013, no tuvieron incidencias. La tercera, de mayor volumen, comenzó el 2 de septiembre de ese año.

Durante esta tercera etapa de inyección, que finalizó el 16 de septiembre, se generaron en las proximidades terremotos de magnitud inferior a 3 (Fig. 4), ninguno sentido por la población. El primero se detectó el 5 de septiembre, día en que se había aumentado el caudal de inyección (Soria López, 2013; CNMC, 2014). Tras acabar ésta (Cesca et al.,

2014), y especialmente a partir del 24 de septiembre, la secuencia entró en una nueva fase (Fig. 4), en la que ya se alcanzaron magnitudes algo más elevadas y en general los terremotos mayores eran proporcionalmente más frecuentes. Fue esta fase la que liberó la mayor parte de la energía de la secuencia, y especialmente los cuatro terremotos mayores, de magnitud superior a 4 (Fig. 4). Dieciséis terremotos llegaron a sentirse en las poblaciones próximas entre el 24 de septiembre y el 4 de octubre, según los informes remitidos por los ciudadanos a través de la web del Instituto Geográfico Nacional (www.ign.es). Sus intensidades fueron entre II (“apenas sentidos”) y III (“débilmente sentidos”). El terremoto de mayor magnitud, de 4.3, el 1 de octubre, se sintió en las regiones más próximas a la costa de las provincias de Castellón, Tarragona y Barcelona, a lo largo de unos 280 km.

El proyecto fue suspendido por orden gubernamental el 26 de septiembre, de forma que se mantienen las instalaciones pero no se realiza ninguna inyección o extracción de gas. El volumen de gas inyectado hasta el momento es de unos 102 millones de metros cúbicos (medidos en condiciones estándar de 25°C y 1 bar; en las condiciones de presión y temperatura en el punto de inyección el gas está unas 150 veces más comprimido). Ésta era una parte mínima de los 600 millones de m³ de gas *colchón* y 1300 millones de m³ de gas extraíble inicialmente previstos para el almacén a pleno rendimiento.

La secuencia sísmica es la mayor registrada desde que, en las últimas décadas, existe una monitorización con suficiente detalle en la zona. En total se detectó un millar de terremotos entre septiembre y octubre (Cesca et al., 2014). Desde noviembre su frecuencia disminuyó drásticamente, si bien algunos terremotos aislados se han seguido detectando en las proximidades hasta, al menos, mediados de 2014. La secuencia fue monitorizada por sismómetros temporales del Observatorio del Ebro (situados en la costa y financiados por la empresa del Proyecto Castor), además de otros permanentes de

éste, del IGN y del Institut Geològic de Catalunya. Esta serie constituye un caso de *enjambre sísmico*: una secuencia en la no hay un único terremoto dominante, sino que los terremotos mayores son de magnitudes similares, y van precedidos por otros terremotos más pequeños.

Las localizaciones inicialmente calculadas para los hipocentros eran muy deficientes, lo que difuminaba y distorsionaba su distribución espacial. Cuando éstos fueron relocalizados con técnicas avanzadas (Cesca *et al.*, 2014), se comprobó que se habían originado en el entorno inmediato del lugar de inyección, y a una profundidad similar a la de ésta (típicamente de 1–3 km). Los epicentros localizados con más precisión se alinean NNE-SSO, una dirección paralela a la Falla Oriental de Amposta (Fig. 2).

Para los terremotos de magnitud 3.3 o superior (todos ellos ocurridos en la segunda fase de la secuencia, tras finalizar la inyección) se pudo estudiar en detalle la fuente sísmica (Cesca *et al.*, 2014). Todos estos terremotos tienen un mecanismo focal muy similar, lo que evidencia la activación de una misma falla o de un sistema de fallas paralelas. Curiosamente, sus posibles planos de falla no son compatibles con la Falla Oriental de Amposta, sino que son precisamente perpendiculares (antitéticos) a ella (Fig. 2). Los terremotos se habrían producido por movimientos casi verticales (con componente dextral) en fallas verticales NO-SE, y/o por desgarre sinistral en fallas de dirección NE-SO (semejante a la de la Falla Oriental de Amposta) pero buzando unos 30° hacia el este. Se calculó que esta última opción era la más compatible con el campo de esfuerzos actual.

Identificar con precisión qué falla o fallas causaron los terremotos es complejo. Para generar un terremoto de magnitud 4.3 basta que se produzca un desplazamiento medio de unos 6 centímetros en una falla con un área de 2 km². Los estudios geofísicos de detalle (referencias en Cesca *et al.*, 2014) muestran numerosas fallas candidatas en torno al lugar de inyección, con orientaciones compatibles con los planos del mecanismo focal.

Además, los hipocentros mejor localizados tienen incertidumbres de en torno a un kilómetro. La elongación de la distribución de epicentros (Fig. 2) es más compatible con los planos de dirección NE-SO que buzaban hacia el E. Al menos una falla con esa orientación, antitética a la falla principal y que ya había sido identificada en perfiles sísmicos, afectaría a la roca almacén y estaría en contacto con el gas inyectado (falla próxima al fondo del sondeo en la Fig. 3).

Desde mediados de los años 60 del siglo pasado se sabe que la inyección subterránea de fluidos (líquidos o gases) puede generar o desencadenar terremotos. El mayor conocido relacionado con inyección de líquidos alcanzó magnitud 5.7 (Ellsworth, 2013), mientras que en relación con inyecciones de gas, antes de 2013 no se conocían casos de magnitud 3 o superior (Gan y Frohlich, 2013).

Aunque no se puede descartar que terremotos de estas magnitudes hubiesen llegado a ocurrir en la zona de manera natural, es muy improbable que la clara correlación espacial

y temporal con la inyección sea puramente casual. La interpretación oficial (Jefatura del Estado, 2014) es que la primera fase de la secuencia, durante la inyección, corresponde a sismicidad *inducida* (directamente causada por la inyección de gas). En esta fase, el aumento de presión en el almacén subterráneo habría modificado sustancialmente el campo de esfuerzos natural en el entorno inmediato, produciendo el movimiento de bloques a favor de fallas relativamente pequeñas, generando terremotos de baja magnitud. La frecuencia de los terremotos decayó inmediatamente en los primeros días tras finalizar la inyección (Fig. 4), lo que concordaría con esta interpretación.

La segunda fase de la secuencia, ya acabada la inyección, se ha interpretado (Cesca *et al.*, 2014; Jefatura del Estado, 2014) como de sismicidad *desencadenada* (del inglés *triggered seismicity*, también traducida como “sismicidad disparada”). Esto implicaría que la presión de la inyección habría ayudado al movimiento de bloques a favor de fallas que ya

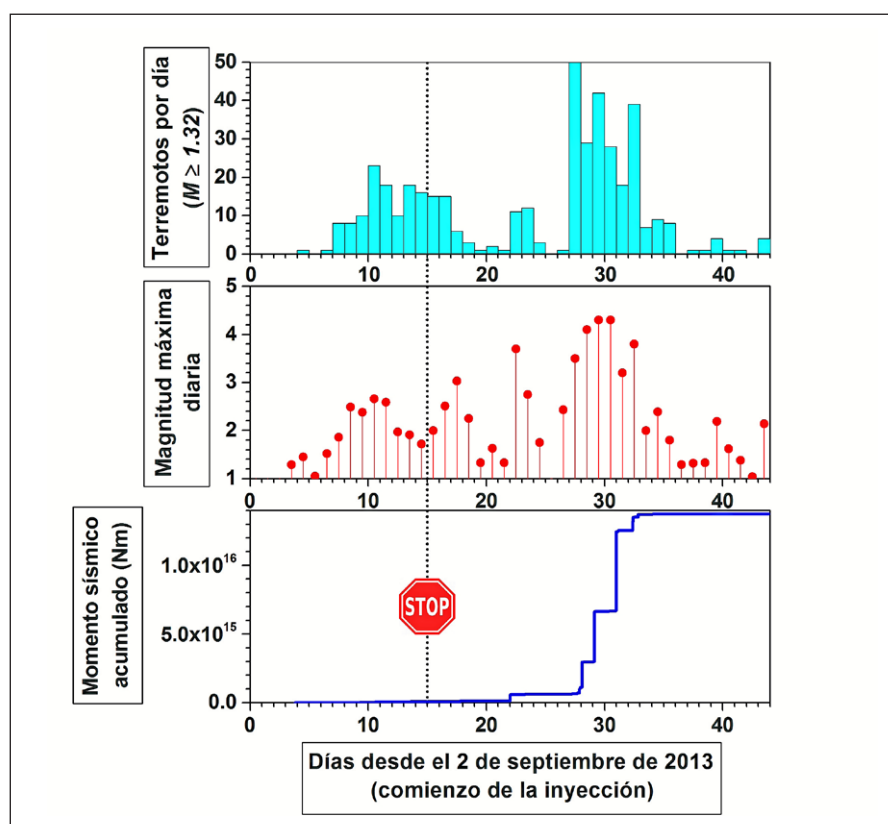


Fig. 4.- Características de la secuencia de terremotos (Cesca *et al.*, 2014). Arriba: Número de terremotos por día (sólo para las magnitudes para las que los datos son completos). Centro: Magnitud máxima diaria. Abajo: Momento sísmico escalar acumulado (una medida proporcional a la energía total liberada por la secuencia). La línea punteada con la señal de stop indica el final de la inyección.

estaban adecuadamente orientadas en el campo de esfuerzos natural. Esto es, fallas cuyos bloques quizá podrían haberse movido generando terremotos naturales en el futuro. Los terremotos desencadenados liberan repentinamente la energía potencial elástica acumulada tectónicamente durante largos periodos de tiempo, y sus magnitudes en principio sólo están limitadas por las dimensiones y propiedades mecánicas de las fallas donde ocurren.

La sismicidad desencadenada puede ocurrir incluso después de realizada una inyección, conforme se difunde la presión del fluido en el volumen rocoso (Ellsworth, 2013). La fuerza de fricción en un plano de falla es proporcional al esfuerzo normal (perpendicular) a él. Si en esta superficie hay fluidos (gas, agua, petróleo), la presión a la que éstos se encuentran actúa en sentido opuesto, reduciendo la fricción. La inyección artificial de

fluidos (agua, gas, etc.) puede incrementar esa presión, lo que reduce la fricción todavía más. De modo que, si los bloques de falla estaban próximos al umbral de fricción, la inyección puede desencadenar el movimiento brusco de uno con respecto a otro, generando el terremoto.

No es probable que los terremotos (al menos los mayores) los genere la fracturación hidráulica de las rocas. Por una parte, porque la sobrepresión de inyección (presión por encima de la original) fue relativamente pequeña, de hasta 0.8 megapascales (MPa), más de veinte veces inferior a la presión hidrostática a la profundidad a la que se inyectaba (Cesca *et al.*, 2014). Por otra, porque los mecanismos focales no muestran evidencias de tensiones asociadas a cambios de volumen (como de apertura de una grieta o de colapso de una cavidad). Las inyecciones de fluidos probablemente pueden desencade-

nar terremotos por sobrepresiones incluso inferiores a los 0.1 MPa (Mulargia y Bizzarri, 2014), lo que apoyaría esta otra interpretación.

Esta secuencia de terremotos es una de las mayores del mundo relacionadas con inyección de gas. El único caso en el que se alcanzaron semejantes (hasta 4.4) se registró en Texas en 2011, y se dio a conocer una vez que los terremotos del Proyecto Castor ya se habían producido (Gan y Frohlich, 2013). Es necesario investigar más por qué en el Castor se han llegado a desencadenar terremotos excepcionalmente grandes, y tener esas circunstancias en cuenta en otros proyectos futuros de inyección subterránea de fluidos. Muy probablemente, son factores importantes que la inyección se realizase en la proximidad de fallas activas, y en una zona donde ya se habían generado terremotos naturales en el pasado reciente. ●

Bibliografía

- Barat Vinacua, C. (2011). Proyecto Castor de almacenamiento subterráneo de gas natural. *Tierra y Tecnología*, 39, 3–8.
- CNMC – Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia (2014). *Informe de supervisión de la gestión del gas colchón en la segunda subasta de gas destinado al nivel mínimo de llenado de los nuevos almacenamientos subterráneos*. 10 de abril de 2014, 30 p. <http://www.cnmc.es/Energ%C3%ADa/Informes/detalle.aspx?idRow=7726> [Última consulta: Mayo de 2015.]
- Gan, W. y Frohlich, C. (2013). Gas injection may have triggered earthquakes in the Cogdell oil field, Texas. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*. 110, 18786–18791.
- Cesca, S., Grigoli, F., Heimann, S., González, Á., Buforn, E., Maghsoudi, S., Blanch, E. y Dahm, T. (2014). The 2013 September–October seismic sequence offshore Spain: a case of seismicity triggered by gas injection? *Geophysical Journal International*, 198, 941–953.
- Ellsworth, W.L. (2013). Injection-induced earthquakes. *Science*, 341, 142, DOI: 10.1126/science.1225942.
- IGME – Instituto Geológico y Minero de España (2012). *QAFI - Quaternary Active Faults Database of Iberia v.2*. <http://info.igme.es/qafi/> [Última consulta: Mayo de 2015.]
- IGN – Instituto Geográfico Nacional (2015). *Catálogo de terremotos*. <http://www.ign.es/ign/layoutIn/sismoFormularioCatalogo.do> [Última consulta: Mayo de 2015.]
- Jefatura del Estado (2014). Real Decreto-ley 13/2014, de 3 de octubre, por el que se adoptan medidas urgentes en relación con el sistema gasista y la titularidad de centrales nucleares. *Boletín Oficial del Estado*, 4 de octubre, 79012–79024.
- Martínez Solares, J.M., Cabañas Rodríguez, L., Benito Oterino, M.B., Rivas Medina, A., Gaspar Escribano, J.M., Ruíz Barajas, S. y Rodríguez Zaloña, O. (2013). *Actualización de mapas de peligrosidad sísmica de España 2012*. Centro Nacional de Información Geográfica, Madrid, 267 p.
- Mulargia, F. y Bizzarri, A. (2014). Anthropogenic triggering of large earthquakes. *Scientific Reports*, 4, 6100.
- OCU - Organización de Consumidores y Usuarios (2014). *OCU denuncia que los consumidores pagarán 4.731 millones de euros por el cierre del Castor*. Nota de prensa, 9 de octubre de 2014, <http://www.ocu.org/organizacion/prensa/notas-de-prensa/2014/gascastor> [Último acceso: Mayo de 2015.]
- Perea, H., Masana, E. y Santanach, P. (2012). An active zone characterized by slow normal faults, the northwestern margin of the València trough (NE Iberia): a review. *Journal of Iberian Geology*, 38, 31–52.
- Seemann, U., Pümpin, V.F. y Casson, N. (1990). Amposta oil field. En: *AAPG Treatise of Petroleum Geology: Atlas of Oil and Gas Fields, Structural Traps II: Traps Associated with Tectonic Faulting*, American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, Oklahoma, USA, A-016, 20 p.
- Soria López, J.M. (2013). Comparecencia del Señor Ministro de Industria, Energía y Turismo (Soria López), para informar de la situación actual del Proyecto Castor. *Diario de Sesiones del Congreso de los Diputados - Comisiones*, X Legislatura, 435 (10 de octubre de 2013), 2–23.