

Sismicidad inducida: El potencial de los terremotos provocados en Kansas

Rex C. Buchanan, K. David Newell, Catherine S. Evans,
Richard D. Miller y Shelby L. Peterie, Servicio Geológico de Kansas

Introducción

La actividad de los terremotos en la corteza terrestre se conoce como sismicidad. Cuando se vincula a actividades humanas, se denomina comúnmente «sismicidad inducida». Las industrias que se han asociado a la sismicidad inducida incluyen la producción de petróleo y gas, la minería, la producción de energía geotérmica, la construcción, las pruebas nucleares subterráneas y el embalse de grandes depósitos (National Research Council, 2012).

A principios de la década de 2000, comenzó a crecer la preocupación por el aumento del número de terremotos en las proximidades de las operaciones de exploración y producción de petróleo y gas, sobre todo en Oklahoma, Arkansas, Ohio, Colorado y Texas.

La perforación horizontal junto con la fracturación hidráulica, popularmente llamada «fracking», con frecuencia ha sido señalada como culpable en el discurso público. Sin embargo, el proceso de fracturación hidráulica se ha confirmado como el causante de los terremotos percibidos unas cuantas veces en todo el mundo. Con mayor frecuencia, se cree que la actividad sísmica detectada que se asocia con las operaciones de petróleo y gas se desencadena cuando se inyectan aguas residuales en los pozos de desecho. En Kansas, tanto la fracturación convencional como la hidráulica procesan agua salada junto con petróleo y gas. En el proceso de eliminación, los productos residuales, incluidas el agua salada y los fluidos de fracturación hidráulica recuperados, se inyectan en rocas porosas profundas y confinadas.

Vincular un terremoto concreto a una actividad humana específica, como eliminación de aguas residuales en un solo pozo, es difícil.

Los términos en **negritas** se definen en el glosario.

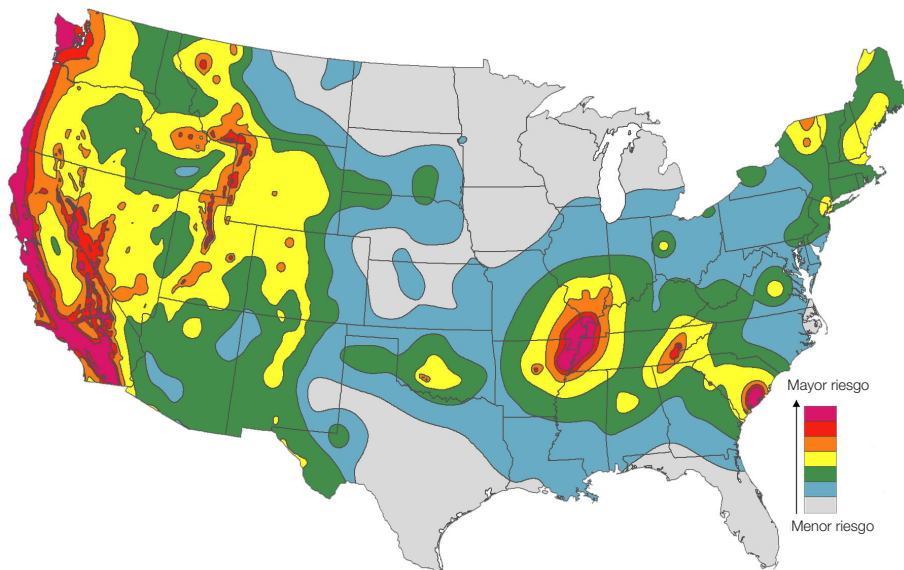


Figura 1. Los mapas de riesgo de terremotos muestran la probabilidad de que las sacudidas del suelo superen un determinado nivel en un período de 50 años. Las áreas de bajo riesgo tienen una probabilidad del 2% de superar un nivel bajo de sacudidas y las áreas de alto riesgo tienen un 2% de probabilidades de alcanzar un nivel mucho mayor (modificado de USGS, 2014).

La compleja geología del subsuelo y los limitados datos sobre esa geología hacen difícil precisar la causa de muchos eventos sísmicos en el Continente central. Sin embargo, un patrón establecido de aumento de la actividad sísmica en un área a lo largo del tiempo puede indicar una correlación entre la actividad humana y los eventos sísmicos.

En el centro-sur de Kansas, los terremotos empezaron a producirse con más frecuencia en 2013, unos tres años después de que se intensificaran ahí la perforación horizontal, la fracturación hidráulica y el posterior desecho de aguas residuales. A fin de obtener más información sobre la geología del subsuelo del área en relación con los terremotos y ayudar a determinar si y cómo el desecho de fluidos a través de múltiples pozos está induciendo la sismicidad sin precedentes, el Servicio Geológico de Kansas (KGS) llevó a cabo la instalación de una red de monitores temporales a principios de 2015 para complementar una red estatal.

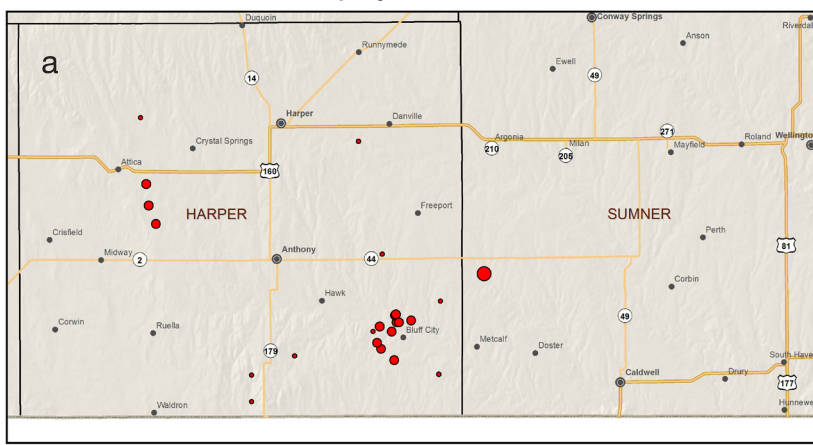
Asimismo, los científicos y otras personas han desarrollado enfoques basados en la geología para identificar las áreas de mayor riesgo y recomendaciones para ayudar a prevenir la posible activación de fallas sometidas a tensión por los métodos de desecho de aguas residuales.

Sin tener en cuenta el aumento de la actividad sísmica en el centro-sur de Kansas, todo el estado presenta en general un riesgo bajo de sentir terremotos (fig. 1). Si el aumento de la actividad sísmica, principalmente en los condados de Harper y Sumner (fig. 2), eleva el riesgo a largo plazo dependerá de si la causa de los terremotos se puede identificar con claridad y mitigar.

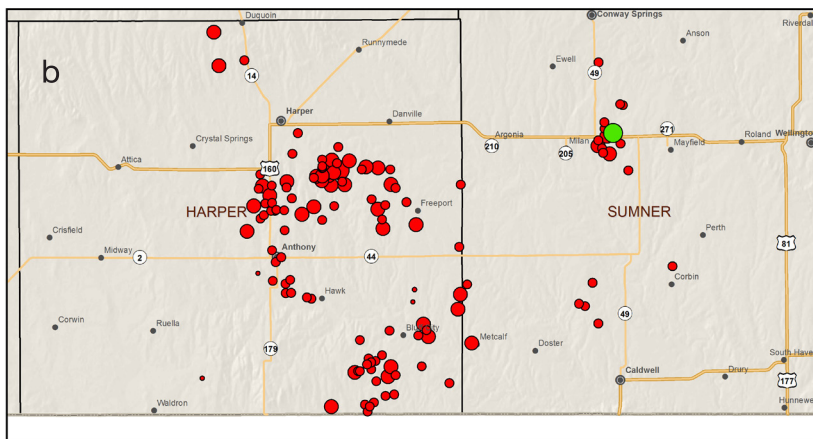
Sismicidad natural vs. sismicidad inducida

La mayor parte de la actividad sísmica se produce cuando la tensión dentro de la corteza terrestre hace que una falla o algunas fallas en las rocas del subsuelo se deslicen y liberen suficiente energía como para generar temblores. La gran mayoría de

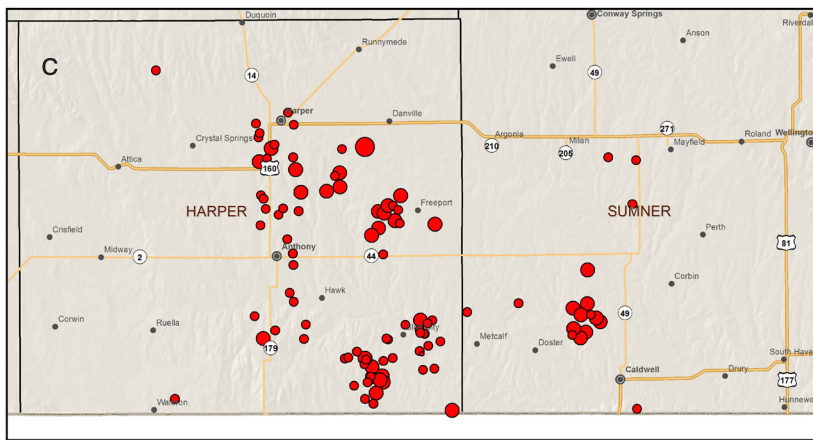
Terremotos 2013: Condados Harper y Sumner



Terremotos 2013: Condados Harper y Sumner



Terremotos 2015 (enero a julio): Condados Harper y Sumner



Servicio Geológico de Kansas
Datos del USGS
3 de agosto de 2015

Magnitud
• 1.0 - 1.9
• 2.0 - 2.9
• 3.0 - 3.9
• 4.0 - 4.9

0 2.5 5 10 Millas

Figura 2. Terremotos en los condados de Harper y Sumner en 2013, 2014 y enero a julio de 2015. El punto verde del mapa de 2014 representa el terremoto de M 4.9 del 12 de noviembre, el evento más potente registrado digitalmente en Kansas. Datos del Centro Nacional de Información Sísmica (NEIC) del USGS, KGS y OGS (KGS, 2015).

los terremotos, se instigan de forma natural ahí donde interactúan las placas tectónicas de la Tierra. En los Estados Unidos, la mayor parte de la actividad sísmica se produce en la costa oeste, a lo largo del límite entre la Placa del Pacífico y la Placa Norteamericana. Lejos de los límites de las placas, los terremotos se desencadenan con más frecuencia cuando los procesos geológicos, como la deposición y la erosión de la roca superficial, alteran el equilibrio de tensiones opuestas en las rocas del subsuelo.

El Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) estima que cada año se producen varios millones de terremotos en todo el mundo, aunque muchos de los pequeños pasan desapercibidos (USGS, 2014). los eventos sísmicos demasiado pequeños como para sentirse en la superficie se conocen como micro terremotos.

Medición de la magnitud e intensidad de los terremotos

Los terremotos pueden medirse de dos maneras. Un método se basa en la magnitud: la cantidad de energía liberada en la fuente del terremoto. El otro se basa en la intensidad: cuánto tiembla el suelo en un lugar específico. Aunque se han desarrollado varias escalas a lo largo de los años, las dos que se utilizan habitualmente hoy en día en los Estados Unidos son la escala de magnitud de momento, que mide la magnitud (M), y la escala de Mercalli modificada, que mide la intensidad. En la actualidad se prefiere la escala de magnitud de momento a la escala de magnitud de Richter, más antigua y conocida, porque supera algunas de las limitaciones de la escala de Richter (USGS, 2014).

Las mediciones en la escala de magnitud de momento se determinan utilizando una compleja fórmula matemática para convertir el movimiento registrado con un sismómetro en un número que representa la cantidad de energía liberada durante un terremoto. La energía liberada por cada medición de un número entero es unas 31 veces mayor que la liberada por el número entero anterior (USGS, 2014). Los terremotos más pequeños registrados hoy en la escala de magnitud de momento tienen magnitudes negativas (por ejemplo, M -2.0) porque el rango de la escala se basa en el de la escala de Richter, desarrollada en la década de 1930, cuando los equipos de monitoreo eran menos sensibles. En la actualidad, los científicos son capaces de detectar terremotos de magnitud inferior a «0» utilizado como referencia la escala de Richter.

Las mediciones de intensidad en la escala de intensidad modificada de Mercalli (MMI) van del I al XII y se basan únicamente en la evaluación de daños y en los relatos de testigos presenciales. Las mediciones de intensidad cerca de la fuente de un terremoto suelen ser más altas que las que se realizan a distancia.

Determinar la intensidad puede ser difícil en áreas escasamente pobladas y con unos cuantos edificios porque la intensidad se calcula en gran medida con base en los efectos que los temblores tienen sobre las estructuras construidas por el hombre.

Aunque las mediciones de la magnitud y la intensidad de un terremoto no son precisamente comparables, en general pueden correlacionarse

cuando se utilizan en la comparación las mediciones de intensidad más cercanas al epicentro (Steeple y Brosius, 1996). La magnitud de los terremotos ocurridos antes de la introducción de la escala de Richter se estima con base en los daños y la intensidad registrados. Los sismólogos clasifican los terremotos modernos por su magnitud, no por su intensidad percibida.

Monitoreo de los terremotos en Kansas

Al menos 31 terremotos percibidos en Kansas fueron documentados en periódicos y otras fuentes entre 1867 y 1976 (KGS, 2015). Algunos de los más recientes también se registraron con equipos sísmicos. Para estudiar los terremotos e identificar el riesgo sísmico en Kansas, el KGS monitoreó una red de sismómetros temporal en todo el estado entre 1977 y 1989. El equipo de monitoreo, que registró más de 200 terremotos de entre M 0.8 y M 4, era lo suficientemente sensible como para detectar disparos de artillería en Fort Riley a 30 millas (50 km) de distancia y grandes terremotos tan lejanos como en Japón (Steepley y Brosius, 1996).

En la actualidad, el USGS opera dos estaciones de monitoreo sísmico permanentes en el estado: una en el Embalse de Cedar Bluff, al oeste de Kansas, y la otra en la Estación Biológica de la Pradera de Konza, al sur de Manhattan, en el noreste de Kansas. En 2014, el USGS instaló varias estaciones temporales en las proximidades del aumento de la actividad sísmica en los condados de Harper y Sumner. Los eventos sísmicos de mayor magnitud de Kansas y los más pequeños cercanos a la frontera estatal de Oklahoma también son captados por el Servicio Geológico de Oklahoma, que cuenta con una red de 30 estaciones sísmicas (OGS, 2015).

A finales de 2014 y principios de 2015, con financiación de la Kansas Corporation Commission (KCC), el KGS instaló una red temporal de siete estaciones en el centro-sur de Kansas que abarca un área geográfica mayor que la red del USGS. El objetivo de la red del KGS es precisar la profundidad y los epicentros de los terremotos, definir las zonas de mayor riesgo, orientar la instalación de una red del KGS permanente en todo el estado, ayudar a orientar futuras respuestas científicas y reglamentarias para la actividad sísmica y recopilar datos geológicos de fondo en áreas con actividad sísmica potencial (Buchanan, 2015). Capaz de registrar micro terremotos de magnitudes de hasta M 1.5 y posiblemente inferiores, la red del KGS puede ayudar a delinear incluso pequeñas fallas y fracturas. En los seis primeros meses, la red detectó más de 1,500 terremotos en Kansas, con una magnitud promedio de 1.8. Mediante el estudio de los datos registrados por todas las redes, los investigadores del KGS y del USGS han identificado una alineación de epicentros al sur de Conway Springs que sugiere una falla o conjunto de fallas que se orientan de noreste a suroeste (Peterie et al., 2015).

Los terremotos y el potencial de sismicidad inducida en Kansas

El mayor terremoto documentado en Kansas, centrado cerca de Wamego, al este de Manhattan, en 1867, sacudió edificios, agrietó paredes, paró relojes, rompió ventanas y, al parecer, provocó el hundimiento del terreno y puso en peligro la orilla de un canal cerca de Carthage, Ohio (Parker, 1868). Con base en los daños y los reportes, se calcula que el terremoto de Wamego tuvo una magnitud de 5.2 (Niemi et al., 2004). Es probable que estuviera asociado a la Dorsal de Nemaha, una cadena montañosa enterrada de 300 millones de años de antigüedad que se extiende aproximadamente desde Omaha hasta la ciudad de Oklahoma. La zona de la falla de Humboldt, en el límite oriental de la Dorsal de Nemaha, sigue estando ligeramente activa (Steepley y Brosius, 1996). La figura 3 muestra los terremotos en Kansas hasta 2014 en relación con la Dorsal de Nemaha, la zona de la falla de Humboldt y otras estructuras geológicas prominentes del subsuelo. También se han identificado fallas y sistemas de fallas más pequeños en el estado, principalmente durante la exploración de petróleo y gas, pero ninguno se ha relacionado con grandes terremotos.

Antes de 2013, el único caso documentado de posible sismicidad inducida en Kansas se produjo en 1989, cuando se registraron pequeños terremotos cerca de Palco, en el condado de Rooks, a unas 30 millas (50 km) al noroeste de Hays. El mayor, de M 4.0, causó daños menores (Steepley y Brosius, 1996). Varios pozos de inyección utilizados para el desecho de aguas residuales (extraídas durante las operaciones convencionales de pozos petrolíferos verticales) se encontraban en las proximidades, y uno de ellos en particular pudo haber estado cerca de una zona de falla profundamente enterrada. Con base

en el historial de inyección de ese pozo, la geología local y el bajo nivel de actividad sísmica previa en el área, los científicos especularon que la sismicidad podría haber sido inducida (Armbruster et al., 1989).

En 2013, el USGS reportó 17 terremotos de M 2 o mayores en Kansas, la mayoría en el condado de Harper (fig. 2a). Unos tres años antes, la perforación en el yacimiento de caliza de Misisipi y el desecho de aguas residuales asociado cruzaron la frontera estatal hacia Kansas desde Oklahoma. Las perforaciones se centraron inicialmente en los condados de Barber y Harper, para extenderse luego hasta incluir el condado de Sumner. En 2014, el número de terremotos reportados en Kansas de magnitud M 2 o superior superó los 100. La mayoría se produjeron en los condados de Sumner o Harper, incluido un evento de magnitud 4.9 el 12 de noviembre a unas nueve millas (14.5 km) al sur de Conway Springs (fig. 2b). De enero a julio de 2015, se registraron más de 100, principalmente en la misma área (fig. 2c; KGS, 2015). La figura 4 ilustra la actividad sísmica en Kansas por mes, desde el 1 de enero de 2013 hasta julio de 2015.

Los científicos están investigando la creciente correlación tanto en el tiempo como en la ubicación entre la sismicidad en el centro-sur de Kansas y la actividad de producción de petróleo y gas, incluida la inyección de grandes volúmenes de agua salada en los pozos. Aunque correlación no equivale a causalidad, sí indica una alta probabilidad.

Es necesario un mayor entendimiento de la compleja geología del subsuelo de la región para estimar qué impacto tienen las actividades humanas sobre la sismicidad. A través de la red de monitoreo temporal del KGS, los sismólogos están recopilando datos vitales sobre la geología y los terremotos.

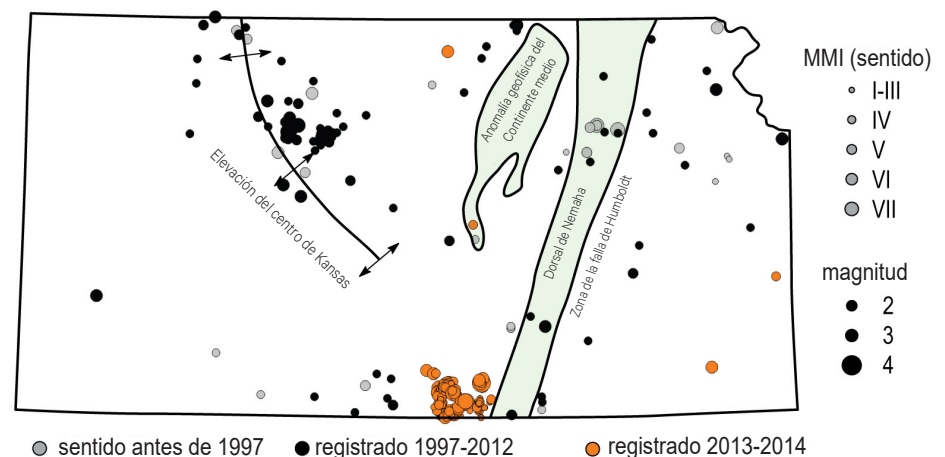


Figura 3. Estructuras geológicas del subsuelo prominentes en Kansas y terremotos documentados o registrados hasta 2014 en relación con esas estructuras (modificado de Hildebrand, 1988).

Un mapa interactivo que muestra la actividad sísmica más reciente en Kansas se encuentra en línea en <http://www.kgs.ku.edu/Geophysics/Earthquakes>.

Geología, fallas y sismicidad inducida

La corteza terrestre está repleta de fracturas y fallas. En condiciones naturales, las extensas fallas profundas de la corteza son capaces de soportar grandes tensiones sin deslizarse. En raras ocasiones, la presión de las aguas residuales inyectadas en pozos profundos puede contrarrestar las fuerzas de fricción de las fallas y provocar terremotos. Para que esto ocurra, debe darse una combinación de actividades humanas, condiciones naturales y eventos geológicos al mismo tiempo. La corteza terrestre en el sitio del pozo de inyección debe estar cerca de un estado crítico de tensión y una falla existente tiene que estar cerca, normalmente a unas 6 millas (10 km). Otros factores determinantes son la ubicación y la orientación de la falla, las propiedades físicas de las rocas del subsuelo circundante, como la densidad y la porosidad, así como el índice y el volumen de aguas residuales inyectadas (National Research Council, 2012). En la mayoría de las circunstancias, debe inyectarse una cantidad significativa de agua durante un período prolongado para provocar el deslizamiento de una falla y liberar energía. Si una falla se afecta, su longitud y la profundidad a la que se rompe influyen en su impacto sobre y debajo de la superficie.

Muchas de las fallas de la Tierra se encuentran en la roca basal de la era Precámbrica, que en Kansas yace bajo las formaciones porosas profundas y confinadas que se usan para el almacenamiento de aguas residuales. Formada hace 500 millones de años o más, la roca basal está recubierta por miles de pies de **roca sedimentaria**. Es posible que las aguas residuales inyectadas no lleguen a la roca basal, pero si la presión creada por la inyección de fluido en las rocas suprayacentes se transmite a la base, aumenta el potencial de sismicidad inducida (Ellsworth, 2013).

Debido a su profundidad, las fallas dentro de la roca basal son difíciles de localizar. Las compañías de exploración de petróleo y gas, que proporcionan gran parte de los datos sobre la geología del subsuelo del estado, rara vez perforan a esa profundidad. Las técnicas de reflexión sísmica utilizadas para identificar las rocas del subsuelo y las fallas son costosas y difíciles de emplear a esa profundidad. La mayoría de las fallas reactivadas durante el desecho de aguas residuales u otras

actividades no se plasmaron en mapas antes de que los terremotos las revelaran (Rubinstein y Mahani, 2015). Hasta que se sepa más sobre la geología de las rocas precámbricas, los científicos no podrán determinar con certeza qué efecto tienen sobre la sismicidad el desecho de aguas residuales y otras actividades de los yacimientos de petróleo y gas.

Fracturación hidráulica, desecho de aguas residuales y sismicidad inducida

La fracturación hidráulica está en el centro del debate sobre la sismicidad inducida en los Estados Unidos. Durante la fracturación hidráulica se producen micro terremotos, normalmente de magnitud inferior a cero (M 0). De hecho, los geólogos con frecuencia los registran para ayudar a identificar la ubicación de las fracturas recién hechas y medir la tensión. Sin embargo, solo se han documentado unos cuantos casos confirmados de actividad sísmica sentida a causa de la fracturación hidráulica (National Research Council, 2012). Estos incluyen cinco eventos sísmicos registrados en Ohio en marzo de 2014 de magnitudes entre 2.1 y 3.0, una serie de eventos de hasta M 2.3 en Inglaterra en 2011, así como una serie de eventos que oscilaron entre M 2.2 y M 3.8 en un área remota de la cuenca del río Horn en la Columbia Británica, Canadá, entre 2009 y 2011 (Skoumal et al., 2015; Holland, 2013; BC Oil and Gas Commission, 2012). También se sospechó que la fracturación hidráulica causó un terremoto de M 2.9 en el centro-sur de Oklahoma en 2011 (Holland, 2013).

La fracturación hidráulica rara vez induce sismicidad sentida porque la

presurización que ocurre durante el proceso por lo general dura tan solo unas horas y afecta únicamente las rocas que rodean de cerca el hueco del pozo (Zoback, 2012). El desecho de aguas residuales, en el que los fluidos se inyectan durante un período más largo, se asocia con más frecuencia a la sismicidad inducida. Desde hace mucho tiempo se ha reconocido que la inyección de fluidos puede desencadenar terremotos. Se ha estudiado bien la actividad sísmica posterior al desecho de aguas residuales en el **Arsenal de las Montañas Rocallosas**, cerca de Denver, a principios de la década de 1960, y por inyección de agua en el **yacimiento petrolífero de Rangely**, en el oeste de Colorado, a finales de la década de 1960 y principios de la de 1970 (Zoback, 2012). Aunque se inyecta una gran cantidad de fluido en cientos de miles de pozos cada año, solo un pequeño número de esos pozos se ha asociado con la sismicidad inducida.

Pozos de inyección de aguas residuales y de desecho Clase II

Aproximadamente 172,000 pozos de inyección de fluidos en los Estados Unidos se utilizan para la inyección subterránea. De esos pozos, designados como pozos de Control de Inyección Subterránea (UIC) Clase II por la Agencia de Protección Ambiental de los EE.UU. (EPA), alrededor del 20% se utilizan para el desecho del agua salada que se produce junto con el petróleo y el gas natural. En el proceso de desecho, el agua salada se inyecta en una formación rocosa profunda seleccionada para el desecho de aguas residuales y no en la formación de la que se produjo. El agua no potable y los productos químicos utilizados en el proceso

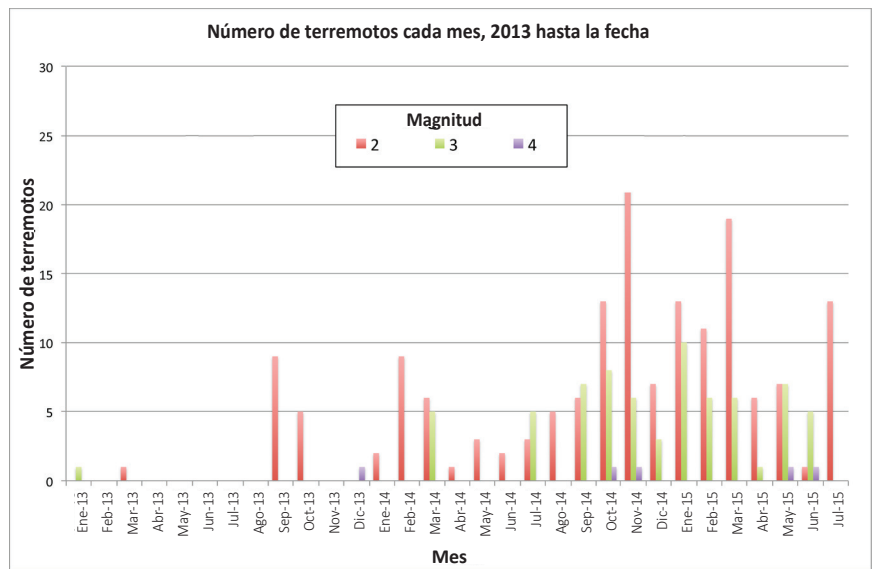


Figura 4. Terremotos en Kansas del 1 de enero de 2013 al 31 de julio de 2015, registrados por el USGS. La mayoría se produjeron en los condados de Harper y Sumner, en el centro-sur de Kansas. Datos del NEIC del USGS (KGS, 2015).

de fracturación hidráulica, que deben desecharse según los requisitos del estado de Kansas, también se inyectan en estos pozos. Del 80% restante de pozos Clase II en los Estados Unidos, la mayoría se utilizan durante operaciones de **recuperación secundaria y mejorada de petróleo** para extraer petróleo adicional de rocas subterráneas (EPA, 2012). Para estas operaciones, es común inyectar agua salada de nuevo en la formación de la que se produjo. El agua inyectada, de manera ideal, se desplaza hacia el pozo de producción, transportando petróleo adicional hacia el pozo.

Es mucho más probable que se produzcan terremotos en los pozos de desecho perforados en formaciones profundas que en los utilizados para la recuperación mejorada de petróleo. Aunque la duración de la inyección y el volumen de fluido para ambos tipos de pozos son similares, la inyección en una formación no alterada previamente eleva la presión de los poros por encima de los niveles iniciales, mientras que los fluidos inyectados en yacimientos casi agotados sustituyen a los fluidos extraídos y la presión de los poros rara vez supera los niveles previos a la producción (Rubinstein y Mahani, 2015).

La EPA regula la concesión de licencias y el funcionamiento de los pozos de desecho Clase II en virtud de la Ley de Agua Potable Segura o delega la autoridad a las agencias estatales. La ley está diseñada principalmente para proteger los acuíferos y otras fuentes de agua potable contra la contaminación por fluidos inyectados. Los operadores de pozos Clase II presentan anualmente un formulario por cada pozo en el que se indican los volúmenes totales inyectados mensualmente y la presión máxima de inyección superficial registrada cada mes.

La KCC regula los cerca de 16,600 pozos Clase II de Kansas. Alrededor de 5,000 de estos pozos se destinan al desecho de aguas residuales y 11,600 a la recuperación secundaria y mejorada de petróleo (KCC, 2014). Los pozos Clase II se utilizan únicamente para la inyección de fluidos asociados a la producción de petróleo y gas. Los residuos industriales peligrosos y no peligrosos, regulados por el Departamento de Salud y Medio Ambiente de Kansas (KDHE), se eliminan en pozos de UIC Clase I. En agosto de 2015, había 49 pozos Clase I en Kansas (KDHE, 2012).

En general, los fluidos de desecho de petróleo y gas en Kansas se inyectan de nuevo en formaciones rocosas profundas del subsuelo «por gravedad». Es decir, los fluidos no se inyectan con presión

añadida, sino que se deja que fluyan hacia estas formaciones rocosas bajo la fuerza de la gravedad. La inyección por gravedad limita la posibilidad de acumulación de presión dentro de una formación rocosa de desecho, lo que reduce el potencial de deslizamiento de la falla. Si los fluidos se inyectan a un ritmo más rápido que la fuerza de la gravedad, la presión añadida puede disminuir la resistencia a la fricción entre las rocas a lo largo de un sistema de fallas existente y permitir el deslizamiento de las rocas. La fuerza del peso del fluido, independiente de la presión de inyección, también puede influir.

Medidas preventivas y correctivas

En respuesta al aumento de la actividad sísmica en el centro-sur de Kansas, el gobernador creó en enero de 2014 el Grupo de Trabajo Estatal sobre Sismicidad Inducida. Con un representante del KGS, otro de la KCC y otro del KDHE, el grupo de trabajo celebró una reunión pública para recabar las opiniones de las partes interesadas y elaboró un protocolo para mitigar los problemas que podrían ser resultado de los terremotos inducidos por la inyección. El «Plan de Acción Sísmica de Kansas» resultante recomendaba la instalación de una red de monitoreo sísmico en todo el estado por parte del KGS y esbozaba un plan de respuesta ante terremotos (KDHE et al., 2015). Según el plan de respuesta, cualquier evento sísmico registrado en el estado de M 3.5 o superior, y algunos menores en lugares específicos, desencadenaría una respuesta. El KGS determinaría la magnitud, la ubicación y la profundidad del evento y le asignaría una puntuación de acción sísmica (SAS, seismic action score) basada en esos factores más el riesgo, la agrupación y el momento, además de otras variables. Una SAS baja no requeriría ninguna otra acción. Si la SAS superara un umbral establecido, el KGS lo notificaría a la KCC y al KDHE, que determinarían la ubicación de los pozos de desecho en un radio de 6 millas (9.5 km) del epicentro. El KGS estudiaría los datos existentes para identificar cualquier falla conocida en el área. En el caso de los pozos sospechosos de inducir sismicidad, la KCC y el KDHE comprobarían el historial de inyección de los pozos y transmitirían toda la información sobre estos al KGS. Con base en los datos de los pozos de inyección, el KGS podría recomendar el despliegue de un conjunto sísmico portátil en el área, y la KCC y el KDHE podrían solicitar a los operadores de los pozos que entregaran reportes más frecuentes sobre los volúmenes de desecho de fluidos. Con base

en los datos disponibles y en las condiciones sísmicas, las tres agencias determinarían si se justificaban los remedios reglamentarios permitidos por la ley (KDHE et al., 2015).

En marzo de 2015, la KCC emitió un orden exigiendo a los operadores que redujeran el índice de inyección en el **acuífero de Arbuckle** profundo en cinco áreas de los condados de Harper y Sumner en las que el KGS había identificado eventos con puntuaciones (SAS) elevadas. Los operadores también tenían que verificar la profundidad de cada pozo y, en el caso de cualquier pozo que penetrara por debajo del acuífero Arbuckle, cementar el fondo hasta la base de este. Se les requirió que reportaran de manera regular los datos que demostraban el cumplimiento con la orden, y el KGS siguió midiendo la actividad sísmica en las áreas. La orden establecía un límite máximo de inyección diaria para todos los pozos de inyección de los condados de Harper y Sumner, no tan solo en las cinco áreas preocupantes. Solo se vio afectada una pequeña fracción de los 4,300 pozos de inyección de Arbuckle que funcionan actualmente en todo el estado (KCC, 2015).

Aunque la reducción del índice y el volumen acumulativos de desecho de agua salada debería ser beneficiosa, se necesita más monitoreo, análisis e investigación geológica y modelización a fin de determinar qué efecto tienen la geología local y las reducciones de desecho sobre la actividad sísmica (Walsh y Zoback, 2015).

Referencias

- Armbruster, J. G., Steeples, D. W., y Seeber, L., 1989, La secuencia sísmica de 1989 cerca de Palco, Kansas: Un posible ejemplo de sismicidad inducida (abstracto): *Cartas de investigación sismológica*, v. 60, no. 4, p. 141.
- BC Oil and Gas Commission, 2012, Investigación de la sismicidad observada en la cuenca del río Horn, <http://www.bcogc.ca/node/8046/download?> (último acceso el 30 de julio de 2015).
- Buchanan, R. C., 2015, Aumento de la sismicidad en Kansas: Al borde, v. 34, no. 6, p. 614–617, DOI: 10.1190/tle34060614.1.
- Ellsworth, W. L., 2013, Terremotos inducidos por inyección: *Ciencias*, v. 341, DOI: 10.1126/science.1225942.
- EPA, 2012, Pozos Clase II - Pozos de inyección relacionados con el petróleo y el gas (clase II): Agencia de Protección Ambiental de los EE.UU., <http://water.epa.gov/type/groundwater/uic/class2/> (último acceso el 27 de marzo de 2014).
- Hildebrand, G. M., Steeples, D. W., Knapp, R. W., Miller, R. D., y Bennett, B. C., 1988, Micro terremotos en Kansas y Nebraska, 1977–87: *Cartas de Investigación Sismológica*, v. 59, no. 4, p. 159–163, http://kusolarworks.ku.edu/bitstream/handle/1808/17375/Steeples_

- SR_59%284%29159.pdf?sequence=1 (último acceso el 30 de julio de 2015).
- Holland, A. A., 2013, Terremotos provocados por la fracturación hidráulica en el centro-sur de Oklahoma: Boletín de la Sociedad Sismológica de América, v. 103, no. 3, p. 1,784-1,792.
- KCC, 2014, Preguntas frecuentes sobre pozos de inyección: Kansas Corporation Commission, http://www.kcc.state.ks.us/conservation/injection_wells_faq.htm#2 (último acceso el 30 de julio de 2015).
- KCC, 2015, La KCC emite una orden para reducir los volúmenes de desecho en partes de los condados de Harper y Sumner (desplegado de prensa): Kansas Corporation Commission, <http://www.kcc.state.ks.us/pi/press/15-01.htm> (último acceso el 30 de julio de 2015).
- KDHE, 2012, Documento informativo sobre la posibilidad de que las operaciones de pozos de desecho Clase I en Kansas provoquen terremotos: Departamento de Salud y Medio Ambiente de Kansas, <http://www.kdheks.gov/uic/download/UICI-IP-1.pdf> (último acceso el 30 de julio de 2015).
- KDHE, KCC y KGS, 2014 [2015], Plan de acción sísmica de Kansas [enmendado]: Kansas Department of Health and Environment, Kansas Corporation Commission, and Kansas Geological Survey, http://kcc.ks.gov/induced_seismicity/state_of_kansas_seismic_action_plan_9_26_14_v2_1_21_15.pdf (último acceso el 30 de julio de 2015).
- KGS, 2015, Terremotos de Kansas: Servicio Geológico de Kansas, <http://www.kgs.ku.edu/Geophysics/Earthquakes> (último acceso el 30 de julio de 2015).
- Consejo Nacional de Investigación, 2012, Potencial de sismicidad inducida en las tecnologías de energía: Academia Nacional de Ciencias, 248 p., <http://dels.nas.edu/Report/Induced-Seismicity-Potential-Energy-Technologies/13355> (último acceso el 3 de agosto de 2015).
- Niemi, T. M., Ferris, A. M., y Abers, G. A., 2004, Investigación de micro terremotos, datos macro sísmicos y licuefacción asociados al terremoto de Wamego de 1867 en el este de Kansas: Boletín de la Sociedad Sismológica de América, v. 94, no. 6, p. 2,317-2,329.
- OGS, 2015, Terremotos en Oklahoma: Servicio Geológico de Oklahoma, <http://earthquakes.ok.gov/what-we-are-doing/oklahoma-geological-survey> (último acceso el 30 de julio de 2015).
- Parker, J. D., 1868, Terremotos en Kansas: The American Journal of Science and Arts, 2ª serie, v. 45, no. 133, p. 129-131.
- Peterie, S. L., Miller, R. D., Intfen, J., Bidgoli, T. y Buchanan, R., 2015, Un enfoque con base geológica para mitigar sismicidad potencialmente inducida en Kansas; en, Procesos de Conferencia, Reunión Anual de la Sociedad de Geofísicos de Exploración, Nueva Orleans, 18 al -23 de octubre de 2015.
- Rubinstein, J. L., and Mahani, A. B., 2015, Mitos y realidades sobre la inyección de aguas residuales, la fracturación hidráulica, la recuperación mejorada de petróleo y la sismicidad inducida: Cartas de Investigación Sismológica, v. 86, no. 4, 8 p., https://profile.usgs.gov/myscience/upload_folder/ci2015Jun1012005755600Induced_EQs_Review.pdf (último acceso el 30 de julio de 2015).
- Skoumal, R. J., Brudzinski, M. R., y Currie, B. S., 2015, Terremotos inducidos por la fracturación hidráulica en la comunidad de Poland, Ohio: Boletín de la Sociedad Sismológica de América, v. 105, no. 1, p. 189-197.
- Steeple, D. W., y Brosius, L., 1996 [2014], Terremotos: Servicio Geológico de Kansas, Circular de información al público 3, 6 p., http://www.kgs.ku.edu/Publications/pic3/pic3_1.html (último acceso el 31 de julio de 2015).
- USGS, 2014, Mapas y datos de riesgo sísmico: Servicio Geológico de los Estados Unidos, <http://earthquake.usgs.gov/hazards/products> (último acceso el 14 de mayo de 2015).
- Walsh, F. R., III, y Zoback, M. D., 2015, Los recientes terremotos de Oklahoma y el desecho de agua salada: Avances de la Ciencia, v. 1, no. 5, <http://advances.sciencemag.org/content/1/5/e1500195> (último acceso el 30 de julio de 2015).
- Zoback, M. D., 2012, Gestión del riesgo sísmico que presenta el desecho de aguas residuales: la Tierra, v. 57, no. 4, p. 38-43, <http://www.earthmagazine.org/article/managing-seismic-risk-posed-wastewater-disposal> (último acceso el 3 de febrero de 2014).
- Glosario**
- Acuífero de Arbuckle:** grupo de rocas profundas y porosas que contiene agua extremadamente salina en el centro-sur de Kansas y que está separado de acuíferos de agua dulce más superficiales por miles de metros de roca impermeable.
- Arsenal de las Montañas Rocallosas:** establecido en la Segunda Guerra Mundial, este arsenal (RMA) al norte de Denver fue utilizado por el ejército estadounidense para desarrollar armas químicas y posteriormente se utilizó para fabricar productos químicos agrícolas. Un pozo de inyección profunda perforado ahí en 1961 para la eliminación de productos químicos peligrosos fue abandonado en 1966 después de que se produjeran 13 terremotos de M 4 o mayores. La actividad sísmica disminuyó pero continuó durante dos décadas (Ellsworth, 2013).
- Epicentro:** lugar de la superficie situado directamente sobre el foco de un terremoto, o punto de ruptura dentro de la Tierra.
- Fracturación hidráulica:** inyección de fluidos y arena en un pozo para fracturar las capas de roca petrolífera con el fin de aumentar su permeabilidad. Coloquialmente se denomina «fracking».
- Perforación horizontal:** perforación que comienza vertical y luego gira gradualmente en dirección horizontal para extenderse a mayor distancia en una zona productora de petróleo.
- Rocas sedimentarias:** rocas formadas a partir de sedimentos, rocas rotas o materia orgánica, con frecuencia depositados por el viento o el agua y luego compactados en capas después de quedar enterradas bajo otros sedimentos.
- Recuperación secundaria de petróleo:** producción de petróleo y gas residual de yacimientos cuyas presiones de depósito han caído después de la recuperación inicial, o primaria, utilizando presión subterránea natural y bombeo. Se inyecta agua o gas en un pozo de inyección de fluidos Clase II para aumentar la presión y forzar la salida del petróleo y el gas a la superficie a través de pozos de producción.
- Recuperación mejorada de petróleo:** producción del petróleo atrapado que queda en el suelo después de las operaciones de recuperación primaria y secundaria mediante la inyección de gases, vapor o productos químicos a través de un pozo de inyección Clase II en una formación productora para reducir la viscosidad y aumentar el flujo del petróleo restante.
- Yacimiento de caliza de Misisipi:** grupo complejo de yacimientos de petróleo y gas dentro de un entorno geológico y geográfico compartido que se extiende desde el centro-norte de Oklahoma hasta el centro-sur y el oeste de Kansas.
- Yacimiento petrolífero de Rangely:** campo petrolífero del noroeste de Colorado en el que el USGS experimentó con el ajuste de la presión del fluido en pozos de inyección entre 1969 y 1973 para determinar cómo el cambio de los índices de inyección podía controlar la sismicidad.



KANSAS
GEOLOGICAL
SURVEY

The University of Kansas

La misión del Servicio Geológico de Kansas, operado por la Universidad de Kansas en relación con su programa de investigación y servicios, es realizar estudios e investigaciones geológicas y recopilar, correlacionar, preservar y difundir información que conduzca a una mejor comprensión de la geología de Kansas, con especial énfasis en los recursos naturales de valor económico, la calidad y cantidad del agua, y los riesgos geológicos.

El programa de Extensión Geológica fomenta la misión del KGS mediante el desarrollo de materiales, proyectos y servicios que comunican información sobre la geología de Kansas, los recursos terrestres del estado y los productos del Servicio Geológico de Kansas.

Circular de información
al público 36 Abril 2014 •
Revisada en agosto de 2015

Kansas Geological Survey
Geology Extension
The University of Kansas 1930
Constant Avenue
Lawrence, KS 66047-3724
785-864-3965
<http://www.kgs.ku.edu>