

1 **INTERVIENE COMO AMIGO DEL TRIBUNAL**

2 Excma. Corte Suprema de Justicia de la Nación:

3

4 **RYAN SCHULTZ**, ciudadano canadiense (\*\*\*\*\*), sismólogo e  
5 investigador sénior del Servicio Sismológico Suizo de la ETH Zürich (Eidgenössische  
6 Technische Hochschule Zürich), con residencia actual en Suiza, con patrocinio legal de  
7 \*\*\*\*\*, con domicilio legal a los efectos de la presente  
8 presentación en \*\*\*\*\* en los  
9 autos caratulados “**FUNDACION AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES (FARN) Y**  
10 **OTROS c/ PROVINCIA DE NEUQUÉN s/ ACCIÓN DE AMPARO**” Exp. 1109/2025, a  
11 V.E., respetuosamente me presento y declaro:

12

13 **1. OBJETO**

14 Que vengo a intervenir en este procedimiento en calidad de Amigo del Tribunal  
15 (“AMICUS CURIAE”) para ofrecer opiniones técnicas y científicas sobre los terremotos  
16 causados por la fracturación hidráulica para la extracción de petróleo y gas en la Cuenca  
17 Neuquina, Argentina, y sobre las directrices y buenas prácticas para gestionar estos riesgos.  
18 Los terremotos causados por la actividad humana, conocidos como “sismicidad inducida”,  
19 plantean graves riesgos. Las sacudidas causadas por la fracturación hidráulica suelen ser lo  
20 suficientemente fuertes como para sentirse y, en algunos casos, causan daños o lesiones. El  
21 alcance total de los impactos de la sismicidad inducida puede variar, pero los peligros y riesgos  
22 son similares a los causados por terremotos de magnitud moderada (M2-M5) en entornos  
23 tectónicos. En algunos casos, la preocupación pública por los riesgos percibidos de estos  
24 terremotos ha llevado a la suspensión de las actividades de desarrollo subterráneo.

25 Comienzo el presente documento revisando las últimas pruebas científicas, que  
26 demuestran de forma definitiva que numerosas actividades humanas, incluida la fracturación

1 hidráulica para la extracción de petróleo y gas, pueden provocar cambios en el subsuelo lo  
2 suficientemente importantes como para desencadenar terremotos.

3 A continuación, describo las políticas recomendadas que están disponibles para  
4 gestionar los riesgos de la sismicidad inducida. Estas recomendaciones se basan en las  
5 directrices y buenas prácticas elaboradas para abordar los casos de fracturación hidráulica en  
6 Norteamérica. En términos generales, estas recomendaciones para una gestión y mitigación  
7 eficaz de los riesgos pueden reducirse a dos componentes principales: (i) un protocolo de  
8 semáforo basado en el riesgo (**TLP**, por sus siglas en inglés) y (ii) un monitoreo sísmico sólido  
9 y transparente.

10 Por último, examino la evidencia sobre la sismicidad inducida por la fracturación  
11 hidráulica en la Cuenca Neuquina, Argentina. Basándome en un estudio científico revisado por  
12 pares que realicé recientemente junto con otros expertos, llegué a la conclusión de que es muy  
13 probable que las operaciones de fracturación hidráulica estén induciendo terremotos en esa  
14 zona (Schultz y otros [2024]. Chasing the ghost of fracking in the Vaca Muerta Formation:  
15 Induced seismicity in the Neuquén Basin, Argentina. *Seismica*, 3[2]). Concretamente, una gran  
16 parte (~42%) de los terremotos que se produjeron en la Cuenca Neuquina entre 2014 y 2024  
17 estaban relacionados con la fracturación hidráulica, y al menos ~0,5% de todas las operaciones  
18 indujeron eventos sísmicos. Estos eventos alcanzaron hasta M4, lo que supone un evento de  
19 magnitud moderada con potencial para causar daños en las viviendas. Es importante destacar  
20 que el alcance de estas conclusiones se vio limitado por la falta de disponibilidad de datos, ya  
21 que la provincia no ha seguido las buenas prácticas en materia de monitoreo sísmico o  
22 transparencia de datos.

23 Basándome en esta evidencia, recomiendo que la provincia de Neuquén implemente un  
24 TLP y garantice la transparencia de su sistema de monitoreo sísmico. Actualmente, el Gobierno  
25 de Neuquén no cuenta con un TLP ni con un sistema de monitoreo adecuado. Aunque el  
26 Gobierno ha dado los primeros pasos para establecer un sistema de monitoreo sísmico, el

1 sistema actual es insuficiente y existen restricciones en cuanto a la disponibilidad de datos.  
2 Concluyo el presente documento con recomendaciones de las buenas prácticas para establecer  
3 un TLP y un sistema de monitoreo sísmico en la Cuenca Neuquina.  
4

## 5 **2. LEGITIMACIÓN Y CALIFICACIONES**

6 La intervención de la figura del Amigo del Tribunal fue establecida por la Acordada  
7 28/2004 en el ámbito de la Corte Suprema de Justicia de la Nación (CSJN) y posteriormente  
8 regulada por la Acordada 7/2013 de la CSJN. En tal sentido, y en relación con la función del  
9 Amigo del Tribunal en el proceso, el artículo 4° de la mencionada Acordada establece lo  
10 siguiente: *“la actuación del Amigo del Tribunal tiene por objeto enriquecer la deliberación en*  
11 *cuestiones institucionalmente relevantes, con argumentos fundados de carácter jurídico,*  
12 *técnico o científico, relativos a las cuestiones debatidas”*.

13 Soy un experto reconocido internacionalmente en el tema de la sismicidad inducida.  
14 Actualmente soy investigador sénior y codirijo el Grupo de Sismicidad Inducida del Servicio  
15 Sismológico Suizo de la ETH Zürich. Realizo investigaciones fundamentales sobre la  
16 sismicidad inducida, lo que incluye identificar casos de sismicidad inducida, comprender las  
17 condiciones y la física que conducen a la reactivación de fallas, modelar y predecir la respuesta  
18 sísmica, evaluar los procedimientos operativos para mitigar el riesgo sísmico, crear sistemas  
19 de control basados en el riesgo y orientar las mejores prácticas. En última instancia, mi  
20 investigación tiene como objetivo mejorar la gestión de los riesgos asociados a estos  
21 terremotos.

22 Mi primer puesto profesional fue como sismólogo en el Servicio Geológico de Alberta  
23 (Canadá), donde trabajé desde 2012 durante aproximadamente ocho años. Durante ese tiempo,  
24 fui responsable de la creación de la red de vigilancia sísmica de Alberta, la catalogación de  
25 terremotos, la identificación de casos de sismicidad inducida, la identificación de los factores  
26 operativos y geológicos que provocaban estos sismos y la elaboración de regulaciones. Este

1 trabajo respondía a las preocupaciones del Regulador Energético de Alberta sobre la sismicidad  
2 inducida en Alberta, donde los sismos eran provocados principalmente por la fracturación  
3 hidráulica para la extracción de petróleo y gas. Tras esta experiencia, completé mi doctorado  
4 en la Universidad de Stanford. Mi tesis consistió en la creación de un diseño basado en el riesgo  
5 para los TLP, que desde entonces ha sido adoptado en directrices de buenas prácticas, tanto por  
6 autoridades regulatorias en el fortalecimiento de sus procesos de decisión como por grupos de  
7 la industria vinculados a la gestión del riesgo sísmico.

8 Recientemente he aplicado mi experiencia a la Cuenca Neuquina y estoy familiarizado  
9 con el panorama científico y de monitoreo local; mis opiniones y recomendaciones se basan en  
10 este conocimiento. Además, no tengo ningún conflicto de intereses en el resultado de esta  
11 decisión, ni vínculos financieros con la industria en Argentina, ni ningún otro interés personal.  
12 Mis recomendaciones están motivadas por el deseo de resolver el problema de la sismicidad  
13 inducida y ayudar a las personas afectadas por sus consecuencias. Las opiniones expresadas  
14 son exclusivamente mías y no reflejan los puntos de vista u opiniones de mi empleador.

15

### 16 **3. LA EVIDENCIA CIENTÍFICA PLENAMENTE ACEPTADA DEMUESTRA QUE** 17 **LA FRACTURACIÓN HIDRÁULICA PUEDE INDUCIR SISMOS**

18 Los sismos naturales se producen principalmente en los límites tectónicos o “fallas”,  
19 que son grandes fragmentos de la corteza terrestre que se desplazan lentamente unos contra  
20 otros. Cuando la tensión entre estas placas se acumula, la energía almacenada se libera en un  
21 evento repentino y violento: un terremoto. Dicho esto, los terremotos también pueden  
22 producirse dentro de estos límites de placas (es decir, intracratónicos), ya que la corteza  
23 terrestre está llena de fallas. La sismicidad inducida es un tipo de sismo intracratónico causado  
24 por la actividad humana.

25 Se han identificado miles de casos de sismicidad inducida, procedentes de múltiples  
26 tipos de actividad humana (Foulger y otros [2018]. Global review of human-induced

1 earthquakes. *Earth-Science Reviews*, 178, 438-514), entre ellas la minería, la construcción de  
2 embalses, la extracción de aguas subterráneas, la producción convencional de petróleo, la  
3 eliminación de aguas residuales, el almacenamiento subterráneo de gases, los sistemas  
4 geotérmicos mejorados y la fracturación hidráulica. En la práctica, cualquier operación que  
5 tenga el potencial de alterar las tensiones o fuerzas en el subsuelo también tiene el potencial de  
6 reactivar fallas y producir un terremoto (Moein y otros [2023]. The physical mechanisms of  
7 induced earthquakes. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4[12], 847-863).

8 Las operaciones que inyectan fluidos bajo tierra pueden provocar sismos (Ellsworth [2013].  
9 Injection-induced earthquakes. *Science*, 341[6142], 1225942). Cuando se inyectan fluidos, se  
10 produce un aumento de la presión intersticial en el subsuelo. Este aumento de presión puede  
11 migrar lateralmente, difundiéndose a través de rocas permeables y alcanzando potencialmente  
12 grandes distancias (decenas de kilómetros desde el lugar de inyección original). Los aumentos  
13 de presión pueden viajar lo suficientemente lejos como para encontrar una falla, lo que puede  
14 reactivarla: el aumento de presión actúa contra las fuerzas que mantienen cerrada una falla,  
15 acercándola efectivamente al punto de deslizamiento. La reactivación de una falla puede  
16 expresarse como un sismo. Los aumentos de presión necesarios para la reactivación pueden ser  
17 pequeños: de hecho, se ha documentado que incluso los pozos de inyección alimentados por  
18 gravedad, que son de presión relativamente baja, pueden provocar sismos (Rubinstein y  
19 Mahani [2015]. Myths and facts on wastewater injection, hydraulic fracturing, enhanced oil  
20 recovery, and induced seismicity. *Seismological Research Letters*, 86[4], 1060-1067).

21 La fracturación hidráulica es una operación que consiste en inyectar fluidos en el  
22 subsuelo a presiones suficientes para provocar la fractura de las formaciones rocosas  
23 adyacentes. La acumulación de presión del fluido fractura la roca, creando nuevas fisuras. Esta  
24 técnica se ha utilizado para la extracción de hidrocarburos atrapados en rocas impermeables (o  
25 “compactas”). Si estas fracturas crecientes encuentran una falla, entonces este mecanismo de  
26 presurización también puede reactivar la falla, lo que podría producir un sismo.

1           Está ampliamente demostrado que la fracturación hidráulica para la extracción de  
2   petróleo y gas provoca sismos (Atkinson y otros [2016]. Hydraulic fracturing and seismicity in  
3   the Western Canada Sedimentary Basin. *Seismological Research Letters*, 87[3], 631-647). Una  
4   lista no exhaustiva de cuencas de hidrocarburos en las que la fracturación hidráulica ha  
5   inducido sismicidad incluye la cuenca del río Horn (Canadá), Bowland Shale (Reino Unido),  
6   la formación Duvernay (Canadá), la formación Montney (Canadá), Utica Shale (EE. UU.),  
7   Marcellus Shale (EE. UU.), la formación Eagle Ford (EE. UU.), la cuenca de Delaware (EE.  
8   UU.) y la cuenca de Sichuan (China). Es probable que haya más cuencas en las que la  
9   fracturación hidráulica esté provocando sismos de las que actualmente se reconocen, ya que el  
10   monitoreo sismológico suele ser insuficiente en los entornos intracratónicos donde se realiza  
11   esta práctica.

12           Las investigaciones han identificado factores que indican cuándo y con qué frecuencia  
13   la fracturación hidráulica induce sismicidad (Schultz y otros [2020a]. Hydraulic fracturing-  
14   induced seismicity. *Reviews of Geophysics*, 58(3), e2019RG000695; Atkinson y otros [2020],  
15   Developments in understanding seismicity triggered by hydraulic fracturing. *Nature Reviews*  
16   *Earth & Environment*, 1[5], 264-277). A escala de cuenca, solo una minoría (menos del 1%  
17   aproximadamente) de los pozos de fracturación hidráulica tiende a provocar sismos, aunque  
18   esta proporción puede ser mayor, hasta alcanzar decenas de por ciento en regiones propensas a  
19   los sismos. A pesar de esta baja probabilidad de que un pozo individual provoque un sismo, la  
20   probabilidad general de que se produzcan terremotos importantes sigue siendo alta para toda  
21   la cuenca: en una cuenca típica en la que se pueden estimular decenas de miles de pozos, es  
22   habitual que cientos de ellos provoquen sismos.

23           Las operaciones de fracturación hidráulica pueden generar eventos relativamente  
24   grandes. Por ejemplo, en cuencas donde la actividad sísmica está relacionada con la  
25   fracturación hidráulica se han registrado eventos de hasta M4 o más. Además, en muchas  
26   cuenas sismogénicas alrededor del mundo, los sismos inducidos por la fracturación hidráulica

1 se han convertido en la fuente predominante de sismicidad. Los sismos inducidos por la  
2 fracturación hidráulica tienden a producirse cerca de los pozos que los causan (a distancia de  
3 cientos de metros), ya que las fracturas estimuladas deben conectarse con fallas susceptibles  
4 de reactivación. La mayor distancia publicada hasta la fecha para un caso asociado a  
5 fracturación hidráulica es de aproximadamente 1,5 km (Schultz y Wang [2020]. Newly  
6 emerging cases of hydraulic fracturing induced seismicity in the Duvernay East Shale Basin.  
7 *Tectonophysics*, 779, 228393) y de aproximadamente 4,0 km para un sistema geotérmico  
8 análogo (Schmittbuhl y otros [2021]. Induced and triggered seismicity below the city of  
9 Strasbourg, France from November 2019 to January 2021. *Comptes Rendus. Géoscience*,  
10 353[S1], 561-584), aunque pueden existir casos no documentados a mayores distancias.

11

12 **3.1. La evidencia científica plenamente aceptada demuestra que los sismos inducidos**  
13 **pueden generar afectaciones significativas, incluyendo daños estructurales,**  
14 **lesiones y pérdidas de vidas humanas**

15 Los peligros y riesgos derivados de la sismicidad inducida pueden ser similares a los  
16 que se derivan de sismos tectónicos comparables. Los daños causados a edificios en los Países  
17 Bajos por eventos inducidos por la extracción de gas (hasta  $M_L$  3,6) dieron lugar a que la  
18 empresa NAM (una operación de Shell y ExxonMobil) tuviera que pagar cientos de millones  
19 de euros en concepto de indemnización a los propietarios de viviendas y empresas afectados  
20 (van der Voort y Vanclay [2015]. Social impacts of earthquakes caused by gas extraction in  
21 the Province of Groningen, The Netherlands. *Environmental Impact Assessment Review*, 50,  
22 1-15). En otro ejemplo, los sismos inducidos por la fracturación hidráulica para la energía  
23 geotérmica en Pohang, Corea del Sur, provocaron un terremoto de  $M_w$  5,5 (Grigoli y otros  
24 [2018]. The November 2017  $M_w$  5.5 Pohang earthquake: A possible case of induced seismicity  
25 in South Korea. *Science*, 360[6392], 1003-1006); las consecuencias incluyeron al menos 75  
26 millones de dólares estadounidenses en daños, 1124 residentes desplazados, 82 heridos y 15

1 hospitalizaciones (Ellsworth y otros [2019]. Triggering of the Pohang, Korea, Earthquake (Mw  
2 5.5) by Enhanced Geothermal System Stimulation. *Seismological Research Letters*, 90[5]). En  
3 lo que respecta específicamente a los sismos causados por la fracturación hidráulica para la  
4 extracción de petróleo y gas, el terremoto del 16 de diciembre de 2018 (M<sub>L</sub> 5,7) en la cuenca  
5 de Sichuan, en China, causó 17 heridos y pérdidas económicas directas de hasta ~7 millones  
6 de dólares estadounidenses, y provocó deslizamientos de tierra y derrumbes de rocas (Lei y  
7 otros [2019]. The December 2018 M<sub>L</sub> 5.7 and January 2019 M<sub>L</sub> 5.3 earthquakes in South  
8 Sichuan basin induced by shale gas hydraulic fracturing. *Seismological Research Letters*,  
9 90[3], 1099-1110). En muchos casos, proyectos subterráneos se han cancelado debido a los  
10 riesgos sísmicos encontrados durante su operación (Foulger et al., 2018, op. cit.). Cabe señalar  
11 que la magnitud de un terremoto mide su tamaño relativo en una escala logarítmica. Esto  
12 significa que cada aumento de una unidad de magnitud representa un incremento exponencial  
13 —y no lineal— de la intensidad del movimiento sísmico y en la energía liberada (Servicio  
14 Geológico de los Estados Unidos [2025; último acceso]. Earthquake Magnitude, Energy  
15 Release, and Shaking Intensity, *sitio web del USGS*). Por ejemplo, un terremoto de magnitud  
16 5 generaría 10 veces más movimiento en el suelo y liberaría 32 veces más energía que un  
17 evento de magnitud 4.

18

#### 19 **4. DIRECTRICES PARA LA GESTIÓN DE LOS RIESGOS DE LA SISMICIDAD** 20 **INDUCIDA POR LA FRACTURACIÓN HIDRÁULICA**

21 Se necesitan planes adecuados de gestión de riesgos para cualquier cuenca en la que la  
22 fracturación hidráulica cree un riesgo probable de sismicidad inducida, a fin de garantizar que  
23 los riesgos sísmicos se eviten o se mitiguen de manera eficaz.

24 Si bien no existe una “solución milagrosa” para prevenir por completo los terremotos,  
25 existen directrices de “buenas prácticas” para su gestión. Estas directrices se basan en los  
26 últimos avances científicos que los gobiernos deberían aplicar en las regiones que sufren

1 terremotos inducidos (Zhou y otros [2024]. Managing induced seismicity risks from enhanced  
2 geothermal systems: A good practice guideline. *Revisiones de geofísica*). Para la gestión de la  
3 sismicidad inducida por la fracturación hidráulica, los dos elementos fundamentales son: 1) la  
4 aplicación de un protocolo de semáforo; y 2) el despliegue de un sistema de monitoreo robusto  
5 y transparente. Existen ejemplos útiles de planes detallados de reducción de riesgos para la  
6 sismicidad inducida que se adhieren a estas buenas prácticas, como el plan operativo para el  
7 experimento de fracturación hidráulica geotérmica de Utah FORGE (Pankow y otros [2023].  
8 Utah FORGE Induced Seismicity Mitigation Plan. *Informe de la Universidad de Utah*, DE-  
9 EE0007080, pág. 224). La fracturación hidráulica geotérmica es análoga a la fracturación  
10 hidráulica para petróleo y gas, por lo que este ejemplo puede servir como modelo integral para  
11 las operaciones de fracturación hidráulica de petróleo y gas.

12

#### 13 **4.1. El diseño y la implementación de un protocolo de semáforo (TLP) basado en el** 14 **riesgo**

15 Los protocolos de semáforo (TLP, por sus siglas en inglés) son el marco más común  
16 utilizado para mitigar de forma reactiva la sismicidad inducida causada por la fracturación  
17 hidráulica (Schultz y otros, 2020a, op. cit.). Por lo general, el TLP establece tres umbrales  
18 denominados: luz roja, amarilla y verde, basados en el nivel actual de actividad sísmica en una  
19 región donde se realiza fracturación hidráulica. Por lo general, estos tres umbrales  
20 corresponden a valores de magnitud predefinidos. Mientras se encuentre dentro del umbral de  
21 “luz verde”, el operador puede continuar sin restricciones. Si una operación alcanza el umbral  
22 de “luz amarilla”, el operador debe ejecutar estrategias de mitigación para reducir la frecuencia  
23 y la magnitud de los terremotos inducidos, por ejemplo, limitando el fluido inyectado o  
24 deteniendo las operaciones durante un periodo de tiempo determinado. El umbral de “luz roja”  
25 es el último punto de parada posible antes de superar un nivel de riesgo intolerable. Los  
26 operadores que alcanzan el umbral de “luz roja”, quedan sometidos a medidas regulatorias, que

1 frecuentemente incluyen la suspensión o el cese definitivo de nuevas operaciones de  
2 fracturación en la zona correspondiente.

3 Hasta la fecha, muchas jurisdicciones han implementado TLP para diversos casos de  
4 sismicidad inducida. En el caso de la fracturación hidráulica, se han implementado TLP en  
5 Alberta (Canadá), Columbia Británica (Canadá), Ohio (EE. UU.), Oklahoma (EE. UU.) y el  
6 Reino Unido (Schultz y otros [2020b]. Risk-informed recommendations for managing  
7 hydraulic fracturing–induced seismicity via traffic light protocols. *Boletín de la Sociedad*  
8 *Sismológica de América*, 110[5], 2411-2422). Los umbrales de “luz roja” han variado entre 0,5  
9 y 4,0 ML, dependiendo de la jurisdicción.

10 El regulador debe, en primer lugar, definir de manera expresa los niveles de riesgo  
11 inaceptables y establecer los umbrales de “luz roja” y “luz amarilla” correspondientes, para  
12 luego garantizar un desarrollo seguro y responsable. Los reguladores también deben garantizar  
13 el cumplimiento mediante un sistema obligatorio de reporte, verificación y auditoría de la  
14 industria. La responsabilidad de ejecutar una operación dentro de los límites del TLP recae en  
15 primer lugar en el operador. Con frecuencia, el operador también es responsable de detallar las  
16 estrategias de mitigación de “luz amarilla”, ya que es quien mejor conoce los detalles de su  
17 operación y el subsuelo local.

18 Si bien existen diferentes formas de determinar los umbrales de TLP, cada vez más  
19 estudios evidencian las ventajas de basar su diseño en principios de gestión de riesgo sísmico.  
20 Bajo este enfoque, los reguladores deben definir explícitamente, antes del comienzo de las  
21 actividades, las tolerancias aceptables respecto de riesgos de afectaciones, daños estructurales  
22 o pérdidas de vidas humanas. A continuación, se puede utilizar la modelización del riesgo  
23 sísmico para definir umbrales de “luz roja” basados en la magnitud (Schultz y otros [2021a].  
24 A risk-based approach for managing hydraulic fracturing–induced seismicity. *Science*,  
25 372[6541], 504-507), basándose en información sobre la estimación del movimiento del suelo,  
26 la amplificación local del sitio, la exposición al peligro y la vulnerabilidad de los activos, con

1 el fin de evaluar y modelar los peligros y riesgos sísmicos (Bommer [2022]. Earthquake hazard  
2 and risk analysis for natural and induced seismicity: towards objective assessments in the face  
3 of uncertainty. *Boletín de Ingeniería Sísmica*, 20[6], 2825-3069). Un aspecto crucial de este  
4 proceso es capturar adecuadamente el potencial de sismicidad remanente: sismos similares a  
5 réplicas que continúan ocurriendo después de que la operación ha cesado (Verdon y Bommer  
6 [2021]. Green, yellow, red, or out of the blue? An assessment of Traffic Light Schemes to  
7 mitigate the impact of hydraulic fracturing-induced seismicity. *Journal of Seismology*, 25, 301-  
8 326; Schultz y otros [2022]. Statistical bounds on how induced seismicity stops. *Scientific  
9 Reports*, 12[1], 1184). Para tener en cuenta los efectos de la sismicidad residual, los operadores  
10 deberán detenerse antes de encontrarse con un riesgo intolerable.

11 La elección del umbral de “luz amarilla” se puede establecer en función del umbral de  
12 “luz roja”. La intención del umbral de “luz amarilla” es servir como amortiguador para evitar,  
13 en última instancia, encontrarse con un evento de “luz roja”. Normalmente, los TLP actuales  
14 para la fracturación hidráulica tienen diferencias de 1,0-2,0  $M_L$  entre los umbrales de luz roja  
15 y amarilla para tener en cuenta los posibles saltos en la magnitud (Schultz y otros [2021b]. A  
16 strategy for choosing red-light thresholds to manage hydraulic fracturing induced seismicity in  
17 North America. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126[12], e2021JB022340).  
18 Cabe destacar que se han observado saltos de magnitud superiores a 2,0  $M_L$  en la sismicidad  
19 inducida por la fracturación hidráulica (Schultz y Wang [2020], op. cit.).

20 El umbral de “luz amarilla” ofrece al operador la oportunidad de poner en marcha sus  
21 estrategias de mitigación, para evitar encontrarse con una “luz roja” mientras sigue realizando  
22 actividades de inyección. Las estrategias de mitigación típicas implican definir un nuevo plan  
23 de inyección que reduzca las tasas y/o presiones de inyección, asegurando que los cambios en  
24 la tasa de inyección se realicen de forma gradual en lugar de rápida, pausando las operaciones,  
25 reorganizando el cronograma de etapas, cambiando los diseños de inyección, permitiendo el  
26 reflujos entre etapas, reduciendo el volumen total de inyección, omitiendo etapas problemáticas

1 o, en última instancia, abandonando la plataforma/pozo (Asociación Canadiense de  
2 Productores de Petróleo [2019]. Anomalous Induced Seismicity due to Hydraulic Fracturing.  
3 *Informe de prácticas compartidas de la industria 2019-0026*, pág. 18).

4 Desafortunadamente, hay poca información sobre la eficacia relativa de las estrategias  
5 de mitigación. No obstante, la implementación de algún tipo de estrategia de mitigación, con  
6 la supervisión adecuada por parte del regulador, es mucho mejor que no exigir ninguna  
7 estrategia de mitigación. En última instancia, esta deficiencia pone de relieve la necesidad de  
8 contar con conjuntos de datos abiertos y transparentes, así como la importancia de la  
9 interacción entre la industria, los reguladores y los académicos para cuantificar la eficacia de  
10 las estrategias de mitigación y orientar las mejores prácticas futuras.

#### 12 **4.2. Monitoreo eficaz de sismos para garantizar cumplimiento con el TLP**

13 Un monitoreo sísmico eficaz es fundamental para garantizar operaciones seguras y  
14 responsables, ejecutar adecuadamente un TLP, reducir las incertidumbres del subsuelo,  
15 informar a las autoridades, hacer cumplir la normativa y generar confianza con las  
16 comunidades afectadas. Para informar y hacer cumplir la normativa de forma adecuada,  
17 también se necesitan catálogos sísmicos bien calibrados y verificados que funcionen al menos  
18 lo suficientemente bien como para ejecutar el TLP.

19 Como mínimo, el regulador debe tener acceso a una red de monitoreo “troncal” (línea  
20 de base). Esta red proporciona un monitoreo sísmico de carácter general a escala de cuenca. La  
21 red troncal debe utilizarse para establecer una línea de base de la sismicidad natural antes de  
22 que comiencen las operaciones de fracturación hidráulica. Una vez iniciadas las operaciones,  
23 este sistema de monitoreo tiene el doble propósito de identificar nuevas regiones de sismicidad  
24 inducida y permitir al regulador garantizar de forma independiente el cumplimiento de la  
25 normativa por parte de la industria. Por lo tanto, este sistema de monitoreo troncal debe ser lo  
26 suficientemente sensible como para detectar todos los eventos de “luz amarilla” y, al mismo

1 tiempo, lo suficientemente preciso como para atribuirlos sin ambigüedad a la fuente correcta  
2 (Zhou y otros [2024], op. cit.). Para llevar a cabo esta tarea de atribución se necesitan datos de  
3 las operaciones de fracturación hidráulica, incluidas las ubicaciones de los pozos y sus  
4 trayectorias subterráneas, así como las ubicaciones de las etapas individuales y los tiempos  
5 correspondientes de las tasas y volúmenes de inyección. Toda esta información debe ser de  
6 acceso público.

7 Por su parte, los operadores son responsables del despliegue y mantenimiento de una  
8 red de monitoreo sísmico “local”, independiente de la red troncal. Los datos recopilados de la  
9 red local se utilizan para crear un catálogo en tiempo real de sismos con una escala  
10 suficientemente precisa como para informar al operador de cómo debe modificar sus  
11 operaciones para mantenerse dentro de las definiciones del TLP. En muchos casos, esto  
12 requiere la atribución de los sismos a etapas individuales y la delimitación de fallas (CAPP  
13 [2019], op. cit.; Zhou y otros [2024], op. cit.). Debido a estos requisitos, la red local suele  
14 requerir una mayor sensibilidad y resolución que la red troncal. Los datos de la red local  
15 también deben ser accesibles al público.

16 La amplia participación de grupos de expertos independientes, partes interesadas y el  
17 público afectado ayuda a garantizar la eficacia de la supervisión (Zhou y otros [2024], op. cit.).  
18 Por ejemplo, grupos de expertos independientes, como servicios geológicos, organismos  
19 nacionales de supervisión o instituciones de investigación, pueden aportar información para  
20 orientar la toma de decisiones o las estrategias de reducción de riesgos, al tiempo que  
21 proporcionan nuevos conocimientos de investigación. La transparencia es fundamental para  
22 fomentar la confianza entre los diferentes actores y el público afectado, de modo que todos  
23 puedan tomar decisiones informadas sobre las operaciones en curso y porque aún quedan  
24 muchas preguntas sin respuesta en torno al proceso físico y la gestión de riesgos de la  
25 sismicidad inducida. Por lo tanto, todas las redes y datos de monitoreo deben compartirse  
26 abiertamente utilizando los principios FAIR (facilidad de búsqueda, accesibilidad,

1 interoperabilidad y reutilización) (Wilkinson y otros [2016]. The FAIR Guiding Principles for  
2 scientific data management and stewardship. *Datos científicos*, 3[1], 1-9), que exigen que los  
3 datos se almacenen de forma permanente en un repositorio que pueda encontrarse fácilmente  
4 y luego compartirse de manera automatizada y fácilmente accesible (es decir, sin necesidad de  
5 interacción humana ni solicitudes de datos).

6       Para ejemplificar cómo funcionan en la realidad la división de responsabilidades y la  
7 transparencia, podemos fijarnos en Alberta (Canadá), donde el regulador y los operadores han  
8 seguido estas prácticas para gestionar y aprender de la sismicidad inducida causada por la  
9 fracturación hidráulica. El Servicio Geológico de Alberta lleva a cabo un monitoreo sísmico  
10 regional, como grupo de expertos en apoyo del Regulador Energético de Alberta. La red  
11 sísmica provincial de Alberta (RAVEN: <https://doi.org/10.7914/SN/RV>) abarca toda la  
12 provincia, con el fin de identificar nuevos casos de sismicidad inducida y garantizar de forma  
13 independiente que los operadores cumplen con la normativa (Schultz y Stern [2015]. The  
14 regional Alberta observatory for earthquake studies network [RAVEN]. *CSEG Recorder*,  
15 40[8], 34-37; Schultz y otros [2015]. Detection threshold and location resolution of the Alberta  
16 Geological Survey earthquake catalogue. *Seismological Research Letters*, 86[2A], 385-397).  
17 Todos los datos de RAVEN se ponen inmediatamente a disposición del público a través de  
18 portales de acceso en línea, según la práctica habitual en sismología. Para un monitoreo a escala  
19 más detallada, los operadores se suscriben a los datos de redes locales gestionadas por  
20 proveedores privados. Como parte del compromiso del regulador con la transparencia, todos  
21 los datos sismológicos locales necesarios para el cumplimiento de la normativa deben  
22 compartirse abiertamente: inmediatamente con el regulador y, al cabo de un año, con el público.  
23 Para facilitar esto, se creó una red sismológica (SCISMN: <https://doi.org/10.7914/eeh3-2y80>)  
24 para albergar los datos; allí, cualquiera puede acceder a esta información (Schultz y otros  
25 [2020c]. The Scientific Induced Seismicity Monitoring Network [SCISMN]. *Informe abierto*

1 *AER/AGS 2019-09* [16 p.]. Edmonton, Canadá: Servicio Geológico de Alberta/Regulador de  
2 Energía de Alberta).

3

#### 4 **5. EVIDENCIA DE QUE LA FRACTURACIÓN HIDRÁULICA EN LA CUENCA** 5 **NEUQUINA ESTÁ CAUSANDO TERREMOTOS**

6 El potencial de utilizar la fracturación hidráulica para explotar petróleo y gas en la  
7 formación Vaca Muerta fue identificado por primera vez en 2010 por Repsol-YPF. Hacia 2019,  
8 las operaciones alcanzaban volúmenes de inyección de entre 10.000 y 100.000 m<sup>3</sup> de fluido  
9 por pozo. Estos volúmenes inyectados son comparables a los que provocan sismicidad inducida  
10 en otras cuencas (Schultz y otros, 2018). Hasta la fecha, se han estimulado más de 4.000 pozos  
11 no convencionales en la Cuenca Neuquina.

12 En consecuencia, la Cuenca Neuquina ha experimentado un aumento de los terremotos tras  
13 el desarrollo de la fracturación hidráulica. Al igual que en otras cuencas, la cobertura de la  
14 vigilancia sísmica en la Cuenca Neuquina ha sido históricamente deficiente; las mejoras en la  
15 vigilancia comenzaron en 2014 (Correa-Otto y otros [2018]. Intraplate seismicity recorded by  
16 a local network in the Neuquén Basin, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*,  
17 87, 211-220; Correa-Otto [2021]. Experimento sismológico en la cuenca neuquina, la región  
18 de mayor explotación de hidrocarburos por métodos no convencionales de la Argentina, *tesis*  
19 *doctoral*, Universidad Nacional de San Juan, p. 219; Correa-Otto y otros [2024].  
20 Seismotectonic and gravimetric analysis of the central Neuquén Basin. *Journal of South*  
21 *American Earth Sciences*, 105036). Investigaciones geofísicas indican que los sismos en esta  
22 zona probablemente tienen un origen inducido (Tamburini-Beliveau y otros [2022].  
23 Assessment of ground deformation and seismicity in two areas of intense hydrocarbon  
24 production in the Argentinian Patagonia. *Scientific Reports*, 12[1], 19198). En Sauzal Bonito,  
25 las sacudidas sísmicas se han sentido con regularidad y han provocado daños en las viviendas  
26 (Surma [2024]. Fracking-induced earthquakes are menacing Argentina as regulators stand by.

1 *Inside Climate News*). En consecuencia, en 2022, la provincia se comprometió a construir 56  
2 nuevas viviendas básicas antisísmicas (12 entregadas hasta la fecha), financiadas en un 50 %  
3 por una de las empresas operadoras (*LM Neuquén* [2024]). Se entregaron viviendas antisísmicas  
4 para vecinos de Sauzal Bonito).

5 Un estudio reciente de la Cuenca Neuquina utilizó criterios metodológicos rigurosos  
6 establecidos para identificar sismicidad inducida, profundizando investigaciones anteriores  
7 (Schultz y otros [2024], op. cit.), y determinó cuándo y dónde los sismos ocurrieron en relación  
8 con las operaciones. El estudio determinó que la fracturación hidráulica fue el factor más  
9 probable en la generación de ciertos sismos registrados en la Cuenca Neuquina. Esta conclusión  
10 se respaldó al observar que los sismos coincidían espacial y temporalmente con las  
11 operaciones. Concretamente, se determinó que aproximadamente el 0,5% de las operaciones  
12 provocaban sismos. A pesar de la baja tasa de asociación, los sismos inducidos alcanzaron  
13 magnitudes de hasta M4. El análisis estadístico arrojó un nivel de confianza superior al 99,99%  
14 de que dichas asociaciones no se debieron al azar.

15 Sin embargo, el estudio no pudo resolver algunas cuestiones adicionales: por ejemplo,  
16 algunos eventos no se asociaron claramente con ninguna operación específica. No está claro si  
17 estos eventos fueron realmente inducidos por la fracturación hidráulica (pero sin asociación  
18 debido a datos incompletos), inducidos por otras actividades humanas o parte de la sismicidad  
19 natural de fondo. La formulación de conclusiones adicionales se vio obstaculizada por la falta  
20 de acceso de los autores a datos adicionales que son fundamentales para resolver estas  
21 cuestiones. Para obtener todos los detalles de este análisis, remito a los lectores al estudio  
22 original (Schultz y otros [2024], op. cit.).

23

24 **6. RECOMENDACIONES PARA ABORDAR LAS DEFICIENCIAS EN LA**  
25 **GESTIÓN ACTUAL DE LA SISMICIDAD INDUCIDA EN LA CUENCA**  
26 **NEUQUINA**

1           Teniendo en cuenta las pruebas presentadas en el estudio anterior y la experiencia con  
2 la sismicidad inducida relacionada con la fracturación hidráulica en otras cuencas, recomiendo  
3 que el Gobierno de Neuquén implemente un TLP y un sistema de monitoreo transparente, como  
4 se describe en las buenas prácticas de las secciones anteriores. En la actualidad, no existe  
5 ningún marco regulatorio para un TLP en la Cuenca Neuquina.

6           Las actuales iniciativas de monitoreo y gestión de la sismicidad inducida en la Cuenca  
7 Neuquina se derivan de los boletines oficiales publicados por el Gobierno de Neuquén en 2021  
8 (*Boletín Oficial*, Edición N.º 3895, Provincia de Neuquén, Argentina; *Boletín Oficial*, Edición  
9 N.º 3899, Provincia de Neuquén, República Argentina). Estos boletines describen la creación  
10 de una red sísmica en la Cuenca Neuquina. El Instituto Nacional de Prevención Sísmica  
11 (INPRES) está designado como autoridad de monitoreo. Los Boletines Oficiales describen  
12 además la extensión espacial del registro, los criterios para su expansión, la difusión pública  
13 de la información y las contribuciones de intercambio de datos por parte de empresas privadas.  
14 Estos Boletines proporcionan un mecanismo regulatorio para la creación de una red de  
15 monitoreo; sin embargo, dejan sin abordar vacíos relevantes para una gestión eficaz del riesgo,  
16 como el establecimiento de un TLP basado en el riesgo, la delimitación clara de estándares de  
17 monitoreo y obligaciones claras de transparencia y acceso a la información.

18           Dado este entorno regulatorio, que contrasta con los requisitos de buenas prácticas  
19 descritos anteriormente, formulo las siguientes recomendaciones para abordar estos vacíos:

20  
21 1. Implementar un TLP en la cuenca de Neuquén

- 22       a. Determinar la autoridad reguladora responsable de hacer cumplir el TLP.
- 23       b. Establecer umbrales claros (es decir, luces amarillas y rojas) para saber cuándo los  
24           operadores deben cambiar y detener las operaciones.

- 1 c. Los umbrales de luz roja deben basarse en principios basados en el riesgo; el  
2 regulador debe definir explícitamente las tolerancias de riesgo aceptables e  
3 inaceptables de las que se puede derivar el umbral de luz roja.
- 4 d. Los umbrales de luz amarilla deben basarse en las mejores prácticas y tener en  
5 cuenta los “saltos de magnitud” (es decir, aumentos repentinos en el evento más  
6 grande).
- 7 e. Definir zonas de exclusión alrededor de infraestructuras críticas, como presas.
- 8 f. Exigir a los operadores que elaboren y presenten al regulador sus planes de  
9 mitigación vinculantes para cuando se alcancen los umbrales de luz amarilla y roja.
- 10 g. El regulador debe evaluar los planes de mitigación propuestos para garantizar que  
11 cumplirán los objetivos del TLP, antes del inicio de las operaciones.
- 12 h. El regulador debe hacer cumplir los planes de mitigación preaprobados por parte  
13 de los operadores, con sanciones en caso de incumplimiento.
- 14
- 15 2. Crear una red de monitoreo eficaz para detectar eventos sísmicos
- 16 a. El regulador debe establecer métricas claras de desempeño del monitoreo,  
17 incluyendo criterios de detectabilidad y resolución espacial.
- 18 b. El sistema de monitoreo debe ser capaz de detectar eventos sísmicos iguales o  
19 inferiores al umbral de luz amarilla.
- 20 c. La resolución espacial debe contar con una resolución espacial que permita  
21 identificar sin ambigüedades la fuente de los sismos que activen los umbrales de  
22 luz amarilla o roja.
- 23 d. El regulador debe garantizar que se cumplan los estándares de desempeño del  
24 monitoreo en la red troncal y, de ser necesario, ajustar la red existente.

- 1 e. El objetivo de la red de monitoreo del regulador es garantizar de forma  
2 independiente que los operadores cumplen con el TLP e identificar nuevas áreas  
3 de sismicidad inducida.
- 4 f. Los operadores deben cumplir con los estándares de desempeño del monitoreo para  
5 las redes locales durante los siguientes periodos: antes del inicio de la inyección,  
6 durante la inyección y durante un periodo razonable después (es decir, al menos  
7 hasta que la sismicidad vuelva a los niveles normales).
- 8 g. Deben existir mecanismos para verificar de forma independiente que se cumplen  
9 estos estándares de desempeño de la red de monitoreo y para verificar de forma  
10 independiente la atribución de un sismo como inducido o natural.

11  
12 3. Crear mecanismos transparentes y abiertos para compartir todos los datos científicos de la  
13 red de monitoreo existente.

- 14 a. Establecer mecanismos de notificación claros, públicos y de fácil acceso para dar  
15 a conocer los sismos de luz amarilla y roja.
- 16 b. Esto incluye todos los datos brutos de las formas de onda de los sismómetros, así  
17 como los productos derivados (por ejemplo, catálogos).
- 18 c. El intercambio de datos debe seguir los principios FAIR (facilidad de búsqueda,  
19 accesibilidad, interoperabilidad y reutilización).
- 20 d. Se deben disponer de mecanismos claros y sencillos para que el público afectado  
21 pueda informar de afectaciones, daños a edificios o daños personales.

22 Tras la publicación de artículos que evalúan la propensión a la sismicidad inducida en  
23 la Cuenca Neuquina (Tamburini-Beliveau y otros [2022], op. cit.; Schultz y otros [2024], op.  
24 cit.), un grupo independiente de expertos con sede en Argentina propuso un marco actualizado  
25 para la gestión de la sismicidad inducida (Observatorio de Sismicidad Inducida [mayo de  
26 2025]. Ley Provincial para la prevención de la sismicidad inducida por la práctica de la

1 fracturación hidráulica en Neuquén: una propuesta del Observatorio de Sismicidad Inducida).  
2 Esta propuesta ofrece un marco normativo para la evaluación previa del riesgo sísmico, el  
3 monitoreo sísmico obligatorio, la definición de los radios de afectación, la adopción de mejores  
4 prácticas operativas, la implementación de un TLP y mecanismos de comunicación  
5 transparente. También describe el propósito de las recomendaciones, su alcance y sus  
6 principios rectores. Además, este documento describe la autoridad encargada de hacer cumplir  
7 la ley, su función y un régimen de sanciones. Por último, ofrece los mecanismos para la  
8 participación ciudadana. Este documento es detallado, exhaustivo y ofrece recomendaciones  
9 pertinentes para la gestión segura de la sismicidad inducida. Muchos de los cambios propuestos  
10 subsanan los vacíos actualmente no abordados en la gestión de la sismicidad inducida en la  
11 Cuenca Neuquina.

12 Las actuales iniciativas de monitoreo en la Cuenca Neuquina [*Boletín Oficial*,  
13 Ediciones N° 3895 y 3899] representan apenas un primer paso hacia la gestión adecuada de la  
14 sismicidad inducida. Las mejoras propuestas en este *Amicus Curiae* constituyen mis  
15 recomendaciones sobre los cambios que aún son necesarios para garantizar el desarrollo seguro  
16 y responsable de la fracturación hidráulica para la extracción de petróleo y gas en Argentina.

17

## 18 **7. PETITORIO**

19 Por lo expuesto, solicito me tenga por presentado como Amigo del Tribunal y se tengan  
20 en consideración las evidencias científicas aquí expuestas.

21 Proveer de conformidad,

22 SERÁ JUSTICIA