

CAPÍTULO PRIMERO

FRACTURACIÓN HIDRÁULICA Y PRINCIPIO PRECAUTORIO

María de las Nieves CARBONELL LEÓN*

SUMARIO: I. *Introducción*. II. *Fracturación hidráulica*. III. *Gestión del riesgo y principio precautorio*. IV. *Riesgos e incertidumbres de la fracturación hidráulica. Aplicación del principio precautorio*. V. *Conclusiones*. VI. *Bibliografía*.

I. INTRODUCCIÓN

En diciembre de 2013, el poder revisor de la Constitución aprobó la reforma constitucional en materia energética, en la que se modificaron los artículos 25, 27 y 28 de la carta magna, y cuyo decreto, publicado en el *Diario Oficial de la Federación* el 20 de diciembre del mismo año, incluyó adicionalmente veintidós artículos transitorios. Para culminar, en agosto de 2014, se publicaron en el *Diario Oficial de la Federación* las leyes secundarias, establecidas en los artículos transitorios, entre ellas la Ley de Hidrocarburos, “que regula el régimen de contratos, licencias y permisos que facultarán a las empresas petroleras y gaseras transnacionales, explorar y extraer hidrocarburos en nuestro país” (Cárdenas, 2015: 548).

Si bien, de acuerdo con la Semarnat, un propósito de la reforma energética es promover la inversión en el sector bajo criterios de responsabilidad social y protección al medio ambiente (Semarnat, 2015), lo cierto es que el nuevo modelo neoextractivista de explotación de hidrocarburos, planteado en los propios objetivos de la reforma, contradice los compromisos contraídos como país en materia de sustentabilidad y cambio climático, ya que

* Química de la Facultad de Química de la UNAM, miembro del Instituto de Investigación y Capacitación para las Ciencias Biológicas. Correo: neus.carbonell.leon@gmail.com.

busca maximizar la producción de hidrocarburos mediante la explotación de yacimientos en aguas profundas y cuencas de lutitas, utilizando para ello, como se detalla más adelante, tecnologías seriamente cuestionadas a nivel mundial, por los severos impactos y riesgos al medio ambiente y a la salud de la población que ocasionan, a la par que aumentarán las emisiones de gases de efecto invernadero, responsables del cambio climático.

De acuerdo con lo señalado por la presidencia de la República, los objetivos de esta reforma son:

- a) Aumentar la producción de petróleo de 2.5 millones de barriles diarios que se producen actualmente,¹ a 3 millones de barriles en 2018 y a 3.5 millones en 2025, así como aumentar la producción de gas natural de los 5 mil 700 millones de pies cúbicos diarios que se producen.
- b) Explorar y explotar los llamados recursos no convencionales, que se encuentran en cuencas de lutitas y aguas profundas.

Para fines del presente análisis, un recurso no convencional es aquel que proviene de un yacimiento no convencional, el cual, de acuerdo con la definición de la CEPAL (Estrada, 2013: 16) corresponde, entre otro tipo de yacimientos, a las formaciones geológicas constituidas por lutitas o también llamadas cuencas de lutitas o de *shale*, y no se incluyen las aguas profundas.

En la explotación de los recursos que se encuentran en *cuencas de lutitas* se emplea la *fracturación hidráulica*, mejor conocida como *fracking*, que se define como la combinación de tres operaciones: perforación vertical, tradicional en la explotación de pozos para yacimientos convencionales; perforación horizontal y fracturamiento hidráulico, de acuerdo con la terminología de la Semarnat (Semarnat, 2015).²

¹ El valor de producción corresponde a 2013. Si bien Pemex tenía la expectativa de mantener una producción promedio diaria en este año (2014) de 2.5 millones de barriles diarios, en el boletín de prensa 83, del 22 de agosto de 2014, la aún empresa paraestatal reconoció cifras erróneas en la producción de crudo debido al contenido de agua en el hidrocarburo, por lo que la producción real en el primer trimestre de 2014 fue de 2 millones 340 mil barriles diarios, lo que representa una baja de 126 mil barriles; sin embargo, las expectativas de aumento de producción con la reforma energética no han sufrido ajuste alguno. <https://www.pemex.com>, consultado el 30 de abril de 2015.

² Es necesario hacer estas precisiones, ya que ni la Ley de Hidrocarburos ni su reglamento contemplan las definiciones mínimas necesarias: como recurso no convencional, yacimiento no convencional, cuencas de lutitas, fracturación hidráulica, etcétera, para distinguir los distintos tipos de actividades que serán motivo de contratos, licencias y permisos con las compañías, así como de las regulaciones en materia de medio ambiente. También es necesario distinguir entre fracturación hidráulica, que es la combinación de las tres operaciones

En Estados Unidos, desde 2007 es noticia la *revolución del shale gas*.

Entre 2007 y 2012, la producción de *shale gas* en EEUU aumentó más de 50 por cien cada año,... y el *fracking* también multiplicó por 18 la producción de lo que se conoce como *shale oil*. “La tecnología del *fracking* y el acceso a los recursos de petróleo y *gas shale* otorgan a EE. UU. una renovada influencia mundial” (Blackwill, 2014: 1)

México cuenta con reservas prospectivas de gas y aceite en lutitas del orden de 60.2 MMbpc³ (Sener, 2013), y es el octavo lugar a nivel mundial (USEIA, 2014) en yacimientos localizados en Coahuila, Nuevo León, Tamaulipas, San Luis Potosí, Querétaro, Veracruz, Hidalgo, Puebla, Oaxaca, Tabasco y Chiapas (Semarnat, 2015).

Últimamente se ha hablado y escrito mucho acerca del *fracking*, tanto en medios especializados de política energética como en revistas científicas ambientales, y está en el punto de mira de redes sociales y organizaciones no gubernamentales, por los severos impactos y riesgos al medio ambiente y a la salud que ocasiona.

En el presente ensayo revisaremos las controversias e incertezas que actualmente existen en la tecnología de la fracturación hidráulica y su relación con los riesgos de daño grave al medio ambiente y a la salud, considerando que si bien no es posible eliminar completamente el riesgo, sí es necesario controlarlo y administrarlo, para lo cual se propone, como uno de los instrumentos de gestión, la aplicación del principio precautorio, a la par que se identificarán las medidas derivadas de la aplicación del principio.

II. FRACTURACIÓN HIDRÁULICA

Los yacimientos de aceite y gas en lutitas se definen como un sistema petrolero de rocas arcillosas orgánicamente ricas, con una porosidad muy baja y de baja permeabilidad, enterradas entre los 450 y los 5,000 metros de profundidad. Los hidrocarburos contenidos en ellas fueron considerados por mucho tiempo como no recuperables. Con los recientes avances y el uso de la fracturación hidráulica o *fracking* se modificó este panorama. El propósito esencial de esta tecnología es abrir y mantener grietas en las rocas empapadas de gas

señaladas, del fracturamiento hidráulico, que se refiere a la última etapa de la fracturación y es la inyección del fluido de fracturación, para provocar la fractura de la roca de lutitas. Definiciones que coinciden con la Guía de la Semarnat.

³ Miles de millones de petróleo crudo equivalente.

o aceite (petróleo o kerógeno); esas grietas sirven para que el hidrocarburo migre hacia un pozo desde el que se puedan extraer del subsuelo (Heinberg, 2014: 54).

Para ello, se perfora verticalmente, como en cualquier pozo convencional, hasta encontrar la capa de lutita con gas o el hidrocarburo, y se puede llegar a una profundidad entre 2.5 y tres kilómetros aproximadamente, o hasta más de cuatro kilómetros, de acuerdo con la Guía de la Semarnat (Semarnat, 2015), y posteriormente, en función del yacimiento, se lleva a cabo la perforación horizontal multietapas, que puede llegar hasta cuatro kilómetros de longitud (Arthur, 2008: 1-21).

Los avances actuales se centran en la consecución de pozos mucho más largos en su sección horizontal, más profundos, más precisos y con múltiples ramas, con objeto de maximizar la eficiencia en la producción. Después de la perforación horizontal, a lo largo de la sección horizontal del pozo se realizan varias etapas de fracturamiento con el fin de incrementar el volumen de roca drenado. Cuanto mayor sea la interconexión de la red de fracturas generadas, más eficiente será el drenaje del gas y aceite, y por lo tanto, mayor el factor de recuperación.

El pozo es fracturado utilizando un *fluido de fracturación*, el cual es bombeado a una presión suficiente para romper la roca impermeable (10,000-20,000 psi). La perforación puede llevar de unas dos a tres semanas. Las fracturas inducidas a altas presiones y con altos volúmenes de fluido de fracturación proveen la conductividad necesaria para permitir que el gas natural y el aceite fluyan desde la formación hasta el pozo y después hasta la superficie.

Para la preparación del *fluido de fracturación* se usan de 8,000 a 80,000 m³, esto es, de 8 a 80 millones de litros de agua (Jackson, 2014: 7.3), agentes propeletentes como arena, que al quedar atrapada en las grietas las apuntala e impide que se cierren una vez terminada la presurización, además de un 0.5% de compuestos químicos con distintas funciones: reductores de fricción, lubricantes, gelificantes, estabilizadores, inhibidores de corrosión, control de dureza (incrustaciones), biocidas, ajuste de pH, entre otras. Aun cuando la composición del fluido de fracturación es en gran medida desconocida, ya que es considerada como secreto industrial, de acuerdo con un estudio del Parlamento Europeo (European Parliament, 2011) se han identificado alrededor de 750 sustancias químicas en los fluidos de fracturación, de las cuales al menos 29 son posibles carcinógenos y compuestos tóxicos; también se han detectado sustancias bioacumulativas, mutagénicas, teratogénicas, disruptoras del sistema endocrino y nervioso o bien perjudiciales para la fauna y flora.

Después de que el pozo se fracture, se tendrá que hacer un “bombeo inverso” para retirar el agua y los fluidos del *fracking*; de entre un 25 a un 90% de los fluidos de fracturación residuales retornan a la superficie para su almacenamiento y posterior tratamiento y/o disposición. Estos fluidos residuales contienen, además de los compuestos químicos ya mencionados, componentes de las capas rocosas y de lutitas que han atravesado, como metales pesados y radiactivos, según las características del yacimiento, así como gas natural e hidrocarburos del propio yacimiento.

Por lo hasta ahora señalado, observamos que la fracturación hidráulica consume grandes volúmenes de agua, poniendo en riesgo la sustentabilidad de los recursos hídricos en las zonas en las que se realiza; representa un riesgo de contaminación de agua tanto superficial como de mantos freáticos y de suelos, desde la preparación y manejo del fluido de fracturación, la fracturación en sí, hasta el manejo y disposición final del fluido que retorna a la superficie; el fluido inyectado que no retorna puede permanecer en el subsuelo y migrar hacia algún acuífero a la superficie, provocando también contaminación (Uresti, 2012: 23-46).

En lo que a contaminación atmosférica se refiere, se emiten compuestos tóxicos a la atmósfera, muchos de ellos elementos orgánicos volátiles, incluyendo emisiones fugitivas de los hidrocarburos propios del yacimiento, durante las operaciones de mezclado de compuestos químicos, derrames y el retorno de los fluidos de fracturación (Rodríguez, 2013: 10), por lo que se ha observado contaminación del aire en zonas aledañas a los campos de explotación, el cual pone en riesgo a la salud de la población y al medio ambiente (Groat, 2012: 32-34)

Por otra parte, las emisiones fugitivas de metano durante la operación de fracturación hidráulica son de 30 a 110% mayores que en una operación convencional, lo que contribuye en forma significativa al aumento de concentración de gases de efecto invernadero, y, por tanto, al cambio climático global (Howarth, 2011: 683)

Adicionalmente, una de las características de este tipo de explotación es la alta tasa de declive por pozo, por lo que se requiere perforar y fracturar un mayor número de pozos para mantener las condiciones de producción, por lo que los riesgos ambientales se multiplican por miles, y decenas de miles, y, por ende, se ocupa para ello una gran cantidad de terreno, con el consiguiente efecto en la fragmentación de hábitats y ecosistemas, deforestación, daños a la biodiversidad, y, por si esto fuera poco, las altas presiones empleadas para la fracturación, así como la reinyección del fluido de fracturación como método de disposición final del mismo, pueden ocasionar sismos. W. Ellsworth reportó que durante la fractura hidráulica rutinariamente se pro-

ducen microsismos menores a 2 grados en la escala de Richter, siendo el mayor sismo registrado en actividades de fracturamiento de 3.6 grados Richter. Sin embargo, la inyección de agua residual de fracturamiento, para su disposición, genera un mayor riesgo; por ejemplo, en Oklahoma se presentó un evento telúrico de magnitud 5.6 grados asociado a esta operación (Ellsworth, 2013: 142).

Desde Estados Unidos, primer país productor del mundo de hidrocarburos provenientes de yacimientos no convencionales, se oyen numerosas voces de alarma, y crece la preocupación por los efectos nocivos del *fracking* (Heinberg, 2014: 59). Por todo el país han surgido cientos de grupos de ciudadanos y coaliciones *antifracking* que han formado redes de apoyo mutuo.

III. GESTIÓN DEL RIESGO Y PRINCIPIO PRECAUTORIO

Si comparamos la explotación convencional y la no convencional, observamos que para esta última se requieren un mayor número de operaciones y componentes, y como en cualquier sistema tecnológico complejo, a mayor número de operaciones y componentes, mayor complejidad, mayor cantidad de propiedades contingentes, y, por tanto, mayor probabilidad de eventos no esperados, fallas y errores, y, por consiguiente, mayor riesgo para la seguridad, el medio ambiente y la salud. Por otra parte, como toda tecnología reciente, existen controversias e incertezas acerca de sus efectos al ambiente; esto se conjuga con la complejidad propia de las ciencias ambientales, con las que tiene que lidiar el derecho ambiental.

Con mucha frecuencia las referencias y valoraciones con las que el Derecho ambiental ha de operar son inciertas o están sujetas a controversia científica. Es prácticamente imposible no sólo ya cuantificar, sino conocer con una mínima precisión un daño al medio ambiente, sobre todo si se tiene en cuenta que en muchos casos sus totales efectos sólo se hacen perceptibles al cabo de un dilatado periodo de tiempo; más compleja aún suele resultar la determinación de las causas que produjeron el daño, puesto que con frecuencia concurren intervenciones humanas, por ejemplo emisiones contaminantes en niveles superiores a los permitidos, con factores exclusivamente naturales, como puedan ser densidades atmosféricas o la propia dirección de los vientos en un momento dado (Esteve, 2008: 201 y 202).

Así, “El principio de precaución surge como respuesta a la patente necesidad de criterios de racionalidad de las decisiones adoptadas en el ámbito de nuevas tecnologías de riesgos inciertos” (EMBRID, 2010: 117), con

objeto de prevenir graves riesgos para el medio ambiente y para la salud y la seguridad humanas.

“La prevención no puede actuar frente a lo que se desconoce. El enfoque precautorio es más versátil a la incertidumbre y permite la adopción de un amplísimo elenco de medidas de gestión del riesgo, que van desde su publicidad hasta la prohibición de los agentes que se supone pueden desencadenarlo” (EMBRID, 2010: 117). La precaución comienza donde aparece la incertidumbre.

La primera versión del principio de precaución en un instrumento internacional es la Carta Mundial de la Naturaleza, ONU Nairobi 1982:

Las actividades que puedan entrañar grandes peligros para la naturaleza serán precedidas de un examen a fondo, y quienes promuevan esas actividades deberán demostrar que los beneficios previstos son mayores que los daños que puedan causar a la naturaleza. *Esas actividades no se llevarán a cabo cuando no se conozca cabalmente sus posibles efectos perjudiciales.*

El principio 15 de la Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y Desarrollo establece:

Con el fin de proteger el Medio Ambiente, los Estados deberán aplicar ampliamente el criterio de precaución conforme a sus capacidades. Cuando haya peligro de daño grave o irreversible la falta de certeza científica absoluta no deberá utilizarse como razón para postergar la adopción de medidas eficaces en función de los costos para impedir la degradación del medio ambiente.

El principio de precaución ha sido incorporado directamente o indirectamente, con diferentes matices, en muchos de los convenios internacionales y comerciales y en distintas legislaciones nacionales, para enfrentar el riesgo de nuevas tecnologías y para aquellos casos en que el riesgo de una decisión equivocada puede ser grave o irreparable en caso de que éstos lleguen a materializarse. No existe un concepto de principio de precaución único.

Embrid Tello, en su libro *Precaución y derecho*, señala que

Usualmente... se tiende a distinguir entre un principio de precaución fuerte o visión maximalista y una precaución débil o visión minimalista, las versiones fuertes de la precaución defienden un principio de inacción en el que la carga de la prueba corresponde siempre a quien introduce el riesgo y no a quien lo sufre, los costes económicos no son oponibles a los costos ambientales, es lícita la fijación de un nivel de riesgo cero, la acción pública puede darse en condiciones de ignorancia científica y la precaución se configura como un principio general del Derecho (Embrid, 2010: 131).

La versión minimalista... pretende un principio de precaución aplicable únicamente en caso de riesgo inminente de graves daños irreversibles, evaluando los costos económicos de tal forma que la intervención pública sólo pueda suceder cuando el gasto comprometido no supere el montante alcanzado por los trastornos que se intenta atajar (p. 131).

Esta visión minimalista, a juicio del autor, deja a la precaución vacía de contenido práctico, y “consiste sencillamente en una negación de la precaución como instrumento jurídico” (Embrid, 2010: 132).

En resumen, y en función de la gradualidad de los distintos niveles de exigencia del principio precautorio o principio de precaución, su invocación y aplicación requiere que se configuren dos supuestos: debe darse una situación de incertidumbre, y, segundo, ha de advertirse en esa situación un riesgo grave para el medio ambiente.

Existen otras causales para la aplicación de este principio; por ejemplo, el requerimiento de mayor información o de estudios de investigación científica sobre la tecnología y sus efectos en un medio ambiente o ecosistema con determinadas características distintas en las que se ha probado la tecnología en otras latitudes; también, como señala Esteve Pardo, en ámbitos de incertidumbre y tecnologías recientes no suele disponerse de la regulación restrictiva suficiente, por lo que se utiliza la precaución como cobertura jurídica para la adopción de medidas por la autoridad competente (Esteve, 2003: 689-700).

En todas las versiones del principio precautorio se hace mención a la adopción de medidas, que van desde la inacción; esto es, prohibir la actividad, o bien llevar a cabo medidas eficaces en función de los costos para impedir la degradación medioambiental, pasando por la inversión de la carga de la prueba y el requerimiento de mayor cantidad de información o investigación en el sitio donde la actividad pretenda llevarse a cabo.

Como se señala en el párrafo anterior, la aplicación de la precaución conlleva medidas restrictivas de carácter jurídico, como negar o condicionar una autorización para desarrollar la actividad presuntamente incierta y dañosa, por lo que es preciso destacar dos parámetros que deben ser tomados en cuenta: primero, el principio de proporcionalidad “Debe existir una razonable proporción entre la magnitud e inminencia del riesgo que se advierte y la intensidad de las medidas que se adoptan” (Esteve, 200: 209). “Las medidas que se adopten deberán ser... provisionales, y en consecuencia se extenderán temporalmente, únicamente mientras subsista la incertidumbre científica...” (Embrid, 2010: 204).

IV. RIESGOS E INCERTIDUMBRES DE LA FRACTURACIÓN HIDRÁULICA. APLICACIÓN DEL PRINCIPIO PRECAUTORIO

En este apartado haremos un recuento de los principales riesgos graves al medio ambiente y a los ecosistemas que implica actualmente esta tecnología, y cuyas incertidumbres ameritan la invocación al principio precautorio.

1. *Sustentabilidad del recurso hídrico*

Uno de los principales motivos de preocupación relacionados con la fractura hidráulica es el alto consumo de agua que conlleva. De principio podemos afirmar que la perforación convencional requiere grandes volúmenes de agua para enfriar y lubricar el cabezal de perforación y eliminar el lodo resultante. Sin embargo, la fractura hidráulica para los yacimientos no convencionales requiere un volumen muy superior de agua, ya que además de la utilizada para la perforación vertical similar a la convencional se requieren volúmenes considerables para la preparación del denominado fluido de fracturación.

Hemos anotado en apartados anteriores, citando a Robert Jackson (Jackson, 2014: 7.3), que el consumo de agua para la preparación del *fluido de fracturación* oscila de 8,000 a 80,000 m³, esto es, de 8 a 80 millones de litros de agua. La cantidad de agua utilizada por pozo en un proceso de fracturamiento varía con la orientación de la perforación “horizontal” con respecto a la vertical, y las características propias de la cuenca, como son la extensión, profundidad y el grosor de la capa o estrato que contiene los hidrocarburos, determinan las etapas de fracturamiento necesarias, y por tanto, el consumo de agua requerido; también influyen algunas propiedades intrínsecas del yacimiento, como la porosidad, la permeabilidad, la temperatura, la presión necesaria (Gallegos 2015: 5841). Es, por tanto, que la cantidad de agua que se va a requerir para el desarrollo de una determinada cuenca es incierta, y no es posible determinarla hasta que no se hayan efectuado las investigaciones correspondientes.

En nuestro país no se tiene aún un estimado del número de pozos que se requerirán perforar para concretar el Programa de Aprovechamiento de Cuencas de lutitas establecido en la reforma energética, y la cantidad de agua que se va a requerir por pozo es incierta y por ahora difícil de predecir, ya que como hemos visto, depende de muchos factores. Lo que sí podemos afirmar es que las áreas hasta ahora identificadas con potencial productivo

de estos recursos, como las provincias petroleras Sabinas-Burro-Picachos y la cuenca de Burgos, se encuentran en la *región hidrológica administrativa* RHA VI, “Río Bravo”,⁴ clasificada por la Conagua como una región con un alto grado de presión sobre el recurso hídrico.⁵

Además, el cambio climático traerá como resultado el incremento de las condiciones de sequía severa, ya que encontrar agua para extraer hidrocarburos en esas zonas puede plantear problemas cada vez más agudos, y no sólo hídricos, sino también sociales, pues forzosamente este uso del agua tendrá que competir con otros usos, como los agrícolas, e incluso para consumo humano.

Concluimos, por tanto, que el riesgo a la sustentabilidad de los recursos hídricos de las regiones donde se llevará a cabo el aprovechamiento de hidrocarburos de yacimientos no convencionales es severo y se conjuga con un alto grado de incerteza acerca de la cantidad de agua que se va a requerir para su explotación. Como medida precautoria se recomienda decretar una moratoria en tanto se determina, en primer término, el número y las características de los pozos que se van a perforar, especialmente en las zonas clasificadas como de *alta presión hídrica*, y, en segundo lugar, se efectúa un estimado de la cantidad de agua que se va a requerir y se seleccionan fuentes alternativas de abastecimiento, cuyo uso no vulnere el derecho humano al agua potable y a la alimentación.

2. Contaminación de suelo, cuerpos de agua superficiales y mantos acuíferos

En Estados Unidos se han registrado casos de contaminación de mantos freáticos cercanos a los sitios donde se lleva a cabo la explotación de hidrocarburos en lutitas, tanto por sustancias químicas contenidas en el fluido de fracturación, componentes naturales de las rocas del subsuelo, como por metano e hidrocarburos propios del yacimiento.

La industria niega sistemáticamente la relación causa-efecto, o bien atribuye estos casos de contaminación a fugas debidas a accidentes, eventos

⁴ El país se ha dividido en trece regiones hidrológico-administrativas (RHA), formadas por agrupaciones de cuencas, consideradas como las unidades básicas para la gestión de recursos hídricos. *Diario Oficial de la Federación* del 1o. de abril de 2010.

⁵ El porcentaje que representa el agua empleada en usos consuntivos respecto a su disponibilidad es un indicador del grado de presión que se ejerce sobre el recurso hídrico en un país, en una cuenca o en una región. Si el porcentaje es mayor al 40%, entonces se ejerce una fuerte presión sobre el recurso. En este caso el grado de presión sobre el recurso es del 72%, de los más altos en el territorio nacional.

naturales y a malas prácticas durante la perforación. Pero existen una serie de premisas que nos indican que pueden deberse a eventos contingentes difíciles de predecir dada la incerteza que rodea a los mismos.

Como ya se ha señalado, la fracturación hidráulica es intensiva en el uso de agua, ya que en promedio se consumen 21 millones de litros del fluido por etapa de fracturamiento, y pueden requerirse varias etapas para lograr que se libere el gas atrapado en los poros y pueda ser aprovechado (Lees, 2012: 579), por lo que a pesar de que el fluido de fracturación contiene menos del 0.5% de la mezcla de compuestos químicos, dados los grandes volúmenes utilizados, la fracturación representa la inyección de cientos de toneladas de compuestos químicos con distintas funciones. Se han identificado alrededor de 750 sustancias, de las cuales 29 son posibles carcinógenos y tóxicos, como benceno, naftaleno, aromáticos policíclicos, éteres, glicoles, ácido clorhídrico, entre otros. Contiene, como ya se ha señalado, sustancias bioacumulativas, mutagénicas, teratogénicas, y disruptoras del sistema endocrino y nervioso, con efectos nocivos en flora y fauna acuáticas (European Parliament, 2011).

Los efectos de cada uno de los compuestos químicos han sido analizados por separado y no se han evaluado los efectos sinérgicos o antagonísticos de la mezcla, y mucho menos las interacciones físicas y químicas del fluido con los compuestos presentes en los distintos estratos geológicos, ya que sería extremadamente complejo; además, la composición del fluido de fracturación es variable, y se desarrolla de acuerdo con las características del campo donde va a aplicarse (European Parliament, 2012).

Aunado a lo anterior, existe muy poco conocimiento sobre la interacción entre el fluido de fracturación y los estratos geológicos con los que tiene contacto. Se ha observado que las lutitas o *shales* atrapan selectivamente metales pesados, como plomo, arsénico, bario, estroncio y cromo. Esto significa que aun sin tomar en cuenta la contaminación causada por los compuestos químicos del fluido de fracturación, la sola operación de inyección de agua y arena a presión, que remueve o lixivia estos metales pesados junto con compuestos radiactivos naturales del suelo —*NORMs* por sus siglas en inglés—, es ya un factor de riesgo.

En un estudio del Departamento de Conservación Ambiental de Nueva York se analizaron trece muestras de aguas residuales y se encontró que contenían niveles de radio 226, un derivado del uranio, en concentraciones 267 veces mayores al límite establecido como seguro para descargas de agua y miles de veces superior al límite permitido para agua potable por las normas aplicables (Lees, 2012: 580).

Por otro lado, se ha estimado que en promedio, sólo entre el 15 y 31.20% de los fluidos de fracturación residuales retornan a la superficie, y son recuperados para su almacenamiento y posterior tratamiento y/o disposición, mientras que el resto puede permanecer durante mucho tiempo alojado y acumulado en el subsuelo, siendo un peligro latente de contaminación de subsuelo y acuíferos fuente de agua potable (Less, 2012: 581).

Con respecto a la contaminación de mantos freáticos con metano, según un informe (Osborn, 2011: 173) publicado en las Actas de la Academia Nacional de Ciencias, se analizaron muestras de agua potable de 68 pozos situados en las inmediaciones de los campos Marcellus y Utica en la Unión Americana. En el 85% de ellos se detectó la presencia de metano. El estudio encontró que las concentraciones medidas de metano en los pozos de agua potable cercanos a las operaciones activas eran diecisiete veces más elevadas que las encontradas en los pozos situados en zonas inactivas. En sesenta de esos pozos se determinó la presencia de hidrocarburos de cadena larga y metano.

Para determinar el origen del metano y demás hidrocarburos en las muestras anteriores, se determinó la relación de carbono 13 y deuterio, isotopos del carbón y del hidrógeno, respectivamente, tanto en metano como en otros hidrocarburos: etano, propano y butano, resultando que la relación era similar a la encontrada en el metano e hidrocarburos procedentes de las cuencas de lutitas de la región analizada, con lo cual quedó demostrada su procedencia, mientras que en muestras tomadas en áreas lejanas a las zonas de explotación de *shale* la relación isotópica es propia del metano de origen biogénico, esto es, por descomposición de materia orgánica, de origen reciente.

En 2009, el Departamento de Protección Ambiental de Pensilvania detectó la migración de gas metano a la red de abastecimiento de agua potable, e informó que incluso se han presentado mezclas explosivas e inflamables en los grifos de agua doméstica, como quedó expuesto en el famoso documental “*Gasland*”.

La mezcla de sustancias químicas tanto del fluido como de los estratos geológicos, así como el metano y los hidrocarburos del yacimiento, representan un fuerte riesgo de contaminación de mantos freáticos, que puede llegar hasta cuerpos de agua superficiales y suelos, debido a que el fracturamiento hidráulico no es una ciencia precisa, “se puede planear una fractura de 1,000 pies y ésta puede abarcar desde 400 hasta 2,000 pies” (Lees, 2012: 581). Existe incertidumbre en el comportamiento de fallas geológicas nuevas o pre-existentes y sus posibles conexiones durante esta actividad, ya que se puede crear una red compleja, consistente en múltiples e irregulares fracturas, cuyo

desarrollo depende de factores geológicos, como la composición de los minerales, las propiedades mecánicas de las rocas y la distribución de las fracturas naturales, así como de factores operativos, como el control de la presión del fluido, su viscosidad y la escala de fracturamiento (Lan, 2014: 1-9).

Aunado a lo anterior, esta operación “puede abrir fallas ya existentes e incrementar la permeabilidad del estrato geológico tanto lateralmente como en forma vertical” (Lees, 2012: 581).

Ambos factores, por sí solos o bien combinados, ocasionan que se abran canales o vías para la migración hasta cuerpos de agua subterráneos, tanto del fluido de fracturación como del fluido de retorno, el cual ya arrastra compuestos procedentes del subsuelo y parte del gas metano e hidrocarburos procedentes del yacimiento.

El riesgo de contaminación se presenta principalmente, dadas las características y evolución de las fracturas antes referidas, durante las actividades de fracturamiento hidráulico, pero también existe probabilidad de daño a cuerpos de agua durante la perforación y retorno del fluido.

Finalmente, es oportuno precisar que aún prevalecen dudas sobre qué hacer con las aguas residuales de retorno del fluido de fracturación. De acuerdo con las características del yacimiento y con las regulaciones existentes en el lugar donde se desarrolle la exploración, se ha optado por utilizar uno o más de los siguientes cuatro métodos de tratamiento (sin embargo, cada uno presenta su propia problemática, y conlleva riesgos al medio ambiente): reinyección en pozos profundos con características geológicas especiales; envío a plantas de tratamiento de aguas, que dada la diversidad de compuestos químicos y radiactivos que pueden contener es muy difícil que un sistema de tratamiento convencional pueda tratarlos y eliminarlos de forma segura; reciclaje en posteriores operaciones de fracturación hidráulica, cuya tecnología está aún en proceso de investigación, es muy costosa y su aplicación dependerá de las características del fluido y de la naturaleza del yacimiento; y la menos recomendable por los enormes riesgos de contaminación de suelos y mantos freáticos es la aplicación directa en terrenos (Olmstead, 2013: 4965 y 4966).

En resumen, existe riesgo de contaminación a suelo, subsuelo, acuíferos y fuentes de agua potable, que podrían ocasionar daño grave a ecosistemas y a la salud de la población, y la conjugación de las siguientes situaciones de las que no se tiene el suficiente conocimiento científico:

- i. Magnitud y trayectoria de las fracturas inducidas y secundarias y la probabilidad de que el fluido de perforación, el fluido de retorno o el gas y los hidrocarburos del yacimiento migren hacia algún acuífero.

- ii. No sólo es desconocida la composición del fluido de fracturación, sino también los efectos aditivos, sinérgicos o bien antagónicos entre los componentes de la mezcla, y tomando en cuenta que muchos de los componentes son bioacumulativos, mutagénicos, teratogénicos y carcinógenos cuyas consecuencias se manifiestan a mediano y largo plazo en la salud y en los organismos acuáticos.
- iii. Se desconocen las reacciones entre el fluido de fracturación y los componentes de los estratos geológicos con los que interacciona, y, en consecuencia, también desconocemos los efectos al medio ambiente y a la salud.
- iv. Se desconocen los mecanismos de la migración del metano y los hidrocarburos del yacimiento a los mantos acuíferos.

Como medidas precautorias, además de la posible moratoria, se recomienda llevar a cabo análisis de las características físicas y químicas en las zonas donde se pretende desarrollar la explotación de estos yacimientos, investigar a fondo las técnicas de fracturación para lograr un control de la propagación de las fracturas y sus efectos; evaluar los riesgos, *conocidos, potenciales e hipotéticos*, promoviendo estudios rigurosos que permitan adaptar la normativa ambiental aplicable. Evaluar la disponibilidad de agua y la capacidad de los acuíferos en zonas destinadas a la explotación, revisión médica de los efectos en salud del metano y otros hidrocarburos, y construir una base de datos de contaminación química, y presencia de metano, y otros hidrocarburos en aguas subterráneas cercanas a los campos donde se pretende llevar a cabo la explotación, e investigar los mecanismos de contaminación por metano y por compuestos químicos (Jackson, 2011: 1-11).

Otra medida precautoria debería ser la inversión de la carga de la prueba; esto es, el promovente de la actividad deberá demostrar la inocuidad del fluido de fracturación hacia el medio ambiente y a la salud. No basta, como se propone en la presentación de la ASEA,⁶ de diciembre de 2014 (ASEA, 2014: 26), establecer como criterio de regulación para el *fracturamiento hidráulico (sic)*⁷ “que la información de compuestos, 100% conocida por la ASEA”: la autoridad debe exigir que se demuestre, además, que la composición es o bien inocua, o que el riesgo a la salud y al medio ambiente es mínimo.

⁶ Agencia Nacional de Seguridad Industrial y Protección Ambiental del Sector Hidrocarburos.

⁷ En la tabla de la página 26 de la presentación se refiere la “Fracturación hidráulica” en el sentido que como tal fue definido por la Semarnat en la Guía ya citada; sin embargo, usa el término “fracturamiento”.

3. *Disruptores endocrinos*

Un caso paradigmático del requerimiento de aplicación del principio de precaución es el de los compuestos disruptores endocrinos, EDC, por sus siglas en inglés, o también conocidos como alteradores endocrinos. De las más de 750 sustancias químicas que se utilizan en el fluido de fracturación, al menos cien de ellas son conocidas o probables disruptores endocrinos, los cuales, como muchas otras de las sustancias empleadas, tienen efectos dilatados, esto es, a largo plazo.

Tomaremos este grupo de sustancias como ejemplo, aun cuando las dudas e incertidumbres sobre su comportamiento aplican a la mayor parte de las sustancias químicas empleadas, como la capacidad de bioacumulación, que depende de los organismos presentes en el ecosistema y en las cadenas tróficas, persistencia en el ambiente, así como de sus efectos sinérgicos y antagonicos

Los disruptores endocrinos son sustancias químicas que pueden interferir con el funcionamiento del sistema hormonal humano y de animales. En el ser humano producen desde anomalías en la reproducción, desórdenes metabólicos, como resistencia a la insulina, diabetes tipo 2 y obesidad, hasta cáncer cervicouterino, prostático o mamario. La exposición en el vientre materno conlleva efectos desproporcionados a muy largo plazo en el feto (Van der Mude, 2011: 510). Los disruptores se encuentran en infinidad de productos, como insecticidas, plastificantes, medicamentos, detergentes, pinturas herbicidas, pesticidas y cosméticos, y ahora en el fluido de fracturación.

Dado que las dosis correspondientes a cada uno de los usos es pequeña, no se habían considerado peligrosos; sin embargo, estudios científicos han empezado a arrojar evidencias de que éstos son más dañinos a pequeñas dosis (Van der Mude, 2011: 510); por ejemplo, la evidencia de interferencias con el sistema inmune (Thornton, 2003: 103-121). A pesar de todo, existen muy pocos estudios científicos que relacionen directamente a los EDC con los efectos en la salud humana, no se conocen todos los mecanismos de acción, no se han estudiado, para todos los compuestos las relaciones dosis-respuesta. Esta situación es representativa de los problemas que se presentan con muchas de las sustancias químicas presentes en el fluido de fracturación. Lo anterior se agrava, debido a los posibles efectos aditivos, antagonicos o sinérgicos con otros componentes del fluido de fracturación, lo que imposibilita estudiar y predecir los posibles efectos en la salud humana y en el ambiente.

4. Contaminación de la atmósfera

Estudios científicos han demostrado la presencia de contaminantes procedentes de los campos de aprovechamiento de hidrocarburos en cuencas de lutitas, que son emitidos durante prácticamente todas las operaciones de fracturación hidráulica (Rodríguez, 2013: 10); pero es importante destacar la liberación de emisiones fugitivas de compuestos tóxicos y peligrosos, en especial durante la inyección a altas presiones del fluidos de perforación, emisiones de fuentes subterráneas y durante el retorno del fluido de perforación. La cantidad y la concentración de cada uno de los contaminantes en estas emisiones son desconocidas.

Los contaminantes más comunes procedentes de las distintas etapas son contaminantes propios de la combustión, hidrocarburos procedentes del yacimiento y compuestos orgánicos volátiles tóxicos y carcinógenos, como benceno, tolueno, etilbenceno y xileno.

En áreas aledañas a los campos de explotación en Texas los niveles de benceno son 55 veces mayores a los permitidos por la Comisión de Calidad Ambiental de Texas. Además, se encontraron compuestos como xileno, disulfuro de carbono, naftaleno y piridinas arriba de los límites permitidos. Estos compuestos son carcinógenos y neurotóxicos (Groat, 2012: 331 y 332).

Dadas las incertezas tanto en la cantidad y en las concentraciones de compuestos tóxicos, neurotóxicos y carcinógenos en las emisiones a la atmósfera que se producen en las actividades de explotación de estos yacimientos como en los efectos a la salud de las poblaciones que habitan en nuestro país en las zonas aledañas donde se llevarán a cabo, adicionalmente es preciso apuntar que en México no existe alguna regulación para sustancias tóxicas, y tampoco una normativa ni en materia de emisiones ni en calidad del aire para estos compuestos, por lo que se considera necesario aplicar el *principio precautorio*, lo que propiciaría una moratoria en tanto se llevan a cabo las investigaciones para determinar el estado base, esto es, la concentración de estos contaminantes antes del inicio de operaciones, las metodologías para la medición y reducción de estas emisiones, así como determinar la sensibilidad de la población y los posibles efectos a su salud, así como los posibles daños a los ecosistemas que ellas se encuentran.

5. Gases de efecto invernadero

La quinta comunicación del grupo de trabajo del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) presenta algunos puntos en los que se

sugieren los posibles beneficios de aumentar la producción de gas natural incluso utilizando la explotación de cuencas de lutitas (Committee on Climate Change, 2014). Esto, debido a que el gas natural tiene una huella de carbono por unidad energética 19 por ciento menor a las gasolinas, 24 por ciento menor al diesel y 28 por ciento menor al combustóleo, por lo que se debe hacer un esfuerzo por transitar hacia el consumo de gas natural como una alternativa para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (Pemex, 2013).

Utilizar gas de fuentes no convencionales, según este organismo internacional, puede lograr una reducción de emisiones si se logra un control de las fugas de gas y se mantienen bajos los requerimientos energéticos del aprovechamiento del gas de lutitas.

Incluso, las grandes petroleras propagaron la idea de que esta era una energía puente para la transición a energías limpias y/o renovables con el razonamiento de que para lograr las metas a largo plazo de reducción de emisiones es necesario reducir la combustión de carbón y otros combustibles con mayor huella de carbono por unidad de energía producida y sustituirlos por gas natural tanto de origen convencional como no convencional.

Petróleos Mexicanos tiene como una de sus líneas de acción para mitigar el cambio climático disminuir la intensidad de carbono aumentando la producción de gas no convencional a través de la perforación de 175 pozos en 2017, pero acota que para el desarrollo y explotación de las reservas de *shale/oil gas* en México es fundamental utilizar métodos de recuperación controlada que minimicen la probabilidad de fugas y venteos en la producción (Pemex, 2013). Sin embargo, existe todavía una brecha en nuestro conocimiento con respecto a las emisiones fugitivas de metano durante la producción de *shale gas*, y se pueden producir efectos adversos colaterales al clima global al incrementar la explotación de combustibles no convencionales.

Estudios encaminados a evaluar la huella de carbono, de todo el ciclo de vida de la producción de gas a partir de fuentes no convencionales mediante la técnica de *fracking*, han concluido que existen aún serios problemas para controlar la principal fuente de gases de efecto invernadero, esto es, las emisiones fugitivas de metano, y estiman que éstas son de 30 a 50% mayores que las que se presentan en la explotación convencional.

Entre el 3.6 y el 7.9% de la producción de metano a partir de aprovechamiento de *shale gas* escapa a la atmósfera en venteos y fugas durante todo el ciclo de vida de un pozo. La mayor cantidad de emisiones ocurre durante la fracturación hidráulica, en que el metano escapa durante el retorno de los fluidos de fracturación y durante el retiro de barrenas y taponés. Durante

la fracturación, grandes volúmenes de agua son forzados a entrar bajo presión en la roca de lutitas y fracturarla y refracturarla, y una cantidad significativa de esa agua que retorna a la superficie está acompañada de grandes cantidades de metano como emisiones fugitivas.

Tomando en cuenta que el metano tiene veintiocho veces mayor potencial de efecto invernadero que el bióxido de carbono producto de la combustión de gas natural o de cualquier otro combustible, el efecto climático de las emisiones fugitivas de metano de la explotación no convencional no sólo compensa, sino que supera con creces los posibles beneficios de la disminución de la huella de carbono por usar por la sustitución de otros combustibles por gas natural, esto es, metano.

- Como parte de la evaluación de la emisión de gases de efecto invernadero durante el ciclo de vida de la producción y uso de combustibles provenientes de cuencas de lutitas y otras fuentes no convencionales, deben considerarse, además de las emisiones fugitivas de metano y otros hidrocarburos (Hultman, 2011: 1-9), (Stephenson, 2011: 10757-10764), (Caulton, 2014: 6237-6242), (Jalife-Rahme, 2014):
- Menor captura de gases de efecto invernadero por la deforestación y retiro de capa vegetal de grandes superficies que se requieren para la fracturación hidráulica, así como la apertura de nuevos campos.
- La energía requerida para la conducción, bombeo de agua, preparación del fluido de fracturación, su transporte al sitio del proyecto, rebombeo a la superficie y tratamiento de aguas residuales.
- Energía para la preparación, manejo y transporte de los compuestos químicos utilizados.

Esta evaluación aún no se efectuado, y además entraña un alto grado de complejidad, por la gran cantidad de variables a considerar, como distancias, rutas de transporte, número de unidades, número de pozos a realizar, área necesaria para la preparación del sitio de la exploración y explotación, tipo de ecosistema y su tasa de captura de bióxido de carbono, etcétera.

En la Ley General de Cambio Climático se establece como meta aspiracional la reducción de un 30% de las emisiones con respecto a la línea base al 2020 y alcanzar el 50% de las emisiones del año 2000 al 2050.⁸

⁸ Artículo segundo transitorio de la Ley General de Cambio Climático, publicada en el *Diario Oficial de la Federación* el 6 de junio de 2012.

Adicionalmente, el gobierno de México entregó a las Naciones Unidas, en marzo de 2014, el documento Compromisos de Mitigación y Adaptación ante el Cambio Climático para el Periodo 2020-2030 iNDC.⁹ Las medidas de mitigación *comprometidas* que el país llevará a cabo y solventará con sus propios recursos o medidas no condicionadas en el rubro de petróleo y gas tiene como meta hasta el 2030 una reducción del 14% de las emisiones de línea base para ese mismo año.¹⁰ El aumento de emisiones fugitivas de metano derivadas de la fracturación hidráulica suponen un factor que pone en riesgo, si no es que imposibilita, el cumplimiento de estos compromisos, que de ser exitosa la Conferencia de las partes en París en diciembre de 2015 pasarán a ser vinculantes.

Además, se pone en un severo riesgo al planeta. En un artículo recientemente publicado, el doctor James Hansen, de la NASA, señaló que un aumento de 2°C en la temperatura del planeta, que es el valor propuesto como meta en las Conferencias de las Partes de la CMNUCC, es muy peligroso, porque causará deshielo de los polos y glaciares, aumento del nivel del mar y súper tormentas (Hansen, 2015: 20059-29179).

Es importante que antes de comenzar la explotación comercial en nuestro país de los campos de lutitas, actualmente en fase de exploración, se lleve a cabo una evaluación de las emisiones fugitivas que se generan durante todo el ciclo de vida del proyecto y del impacto que el aumento de estas emisiones tendrá en nuestros inventarios, y, en consecuencia, el riesgo a no dar cumplimiento a los compromisos internacionales, poniendo en riesgo severo al planeta. Se confirma la moratoria como medida de precaución.

6. Ausencia de regulación

Mencionábamos antes, que en ámbitos de incertidumbre y tecnologías recientes no suele disponerse de la regulación restrictiva suficiente, por lo que se utiliza la precaución como cobertura jurídica para la adopción de medidas por la autoridad competente (Esteve, 2003: 689-700). En nuestro

⁹ *Inteded Nationally Determined Contributions*, atendiendo al compromiso internacional que previo a la Conferencia de las Partes COP, 21 de la Convención Marco de Cambio Climático todas las partes diseñarían acciones y compromisos para el acuerdo global vinculante de reducción de emisiones.

¹⁰ En este documento, en que México establece compromisos de mitigación, no se toman en cuenta el aumento de emisiones de gases de efecto invernadero, que ocasionará el aumento de producción de hidrocarburos asociado a la reforma energética, mucho menos las emisiones de GEI por emisiones fugitivas derivadas de la explotación no convencional.

país no existen las normas jurídicas mínimas necesarias para hacer frente a los riesgos que esta tecnología entraña tanto para la seguridad como para la salud de la población y del medio ambiente, por lo cual es pertinente aplicar el principio precautorio, y, como medida precautoria, contar con una moratoria para, además de llevar a cabo los estudios científicos para la evaluación de las riesgos y consecuencias, con parámetros acordes a las condiciones de nuestro país, desarrollar como mínimo la siguiente normatividad:

- Instrumentar la evaluación ambiental estratégica, la cual sólo se encuentra definida y mencionada como una facultad de la Agencia Nacional de Seguridad Industrial y Protección Ambiental,¹¹ pero no se establecen las reglas, los alcances y las metodologías para su desarrollo. Esta evaluación deberá aplicarse al Programa para el Desarrollo de la Explotación de Cuencas de Lutitas, antes de su inicio, y cuyas recomendaciones deberán ser aplicadas en la evaluación de impacto ambiental para la autorización para cada uno de los campos.
- Desarrollar la legislación nacional en materia de sustancias para la regulación del registro, fabricación y uso de sustancias químicas tóxicas y peligrosas, que incluya los peligrosos compuestos químicos contenidos en el fluido de fracturación.
- Desarrollar los estudios encaminados a la evaluación de los efectos a la salud y al ambiente de la mezcla de estos compuestos.
- Elaborar la regulación en materia de riesgo ambiental: la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente contiene sólo cinco artículos dedicados a las actividades altamente riesgosas, cuya definición y clasificación de lo que debe considerarse como tal debiera estar en el reglamento que para tal efecto debería haberse expedido; sin embargo, a la fecha, después de casi veinte años de haberse promulgado (1996), este reglamento no ha sido emitido, dejando inaplicable los artículos de la Ley; si bien se entregan a la Semarnat estudios de riesgo ambiental, que se elaboran siguiendo las guías que la Secretaría proporciona en su página de internet, estos estudios de riesgo ambiental están enfocados a accidentes industriales, y no cubren ni contemplan, y por tanto no son aplicables, a los severos riesgos que se vislumbra traerá consigo la fractura hidráulica. Es necesario que este reglamento sea emitido, que tenga

¹¹ Ley de la Agencia Nacional de Seguridad Industrial y Protección al Medio Ambiente del Sector Hidrocarburos, artículos 3o. y 5o., *Diario Oficial de la Federación*, México, 11 de agosto de 2014.

una visión de precaución para la gestión de riesgos y que la autoridad proporcione las herramientas para la gestión de los riesgos ambientales que esta tecnología trae aparejados.

- Deben emitirse las normas oficiales mexicanas para descarga y manejo de aguas residuales, así como las emisiones a la atmósfera que contemplen los contaminantes más comunes de la fracturación, así como los límites máximos permisibles; asimismo, se requieren normas mexicanas que estandaricen las metodologías para la evaluación de emisiones fugitivas y procedentes del subsuelo.

V. CONCLUSIONES

El principio de precaución es una medida para enfrentar y gestionar el riesgo de nuevas tecnologías y para aquellos casos en que el riesgo de una decisión equivocada puede ser grave o irreparable en caso de que éstos lleguen a materializarse.

Para la invocación y aplicación del principio de precaución se requiere que se configuren dos supuestos: debe darse una situación de incertidumbre, y, segundo, ha de advertirse en esa situación un riesgo grave para el medio ambiente.

En las actividades involucradas en la fractura hidráulica para la explotación de gas e hidrocarburos en cuencas de lutitas se actualizan ambos presupuestos; existe riesgo de contaminación a suelo, subsuelo, acuíferos y fuentes de agua, potable y de la atmósfera, que podrían ocasionar daño grave a ecosistemas y a la salud de la población, así como la exacerbación de los efectos climáticos, y en todos los casos no se tiene el suficiente conocimiento científico para llevar a cabo acciones de prevención. Adicionalmente, en nuestro país no existen las normas jurídicas mínimas necesarias para hacer frente a los riesgos que esta tecnología entraña para la seguridad, para la salud de la población y para el medio ambiente.

Una opción, por tanto, para gestionar el riesgo grave que conlleva esta tecnología es invocar el *principio de precaución*, y analizar la posibilidad de aplicar medidas precautorias, como decretar una moratoria en tanto se cuenta con más información acerca de esta tecnología y sus consecuencias al ambiente y se llevan a cabo las investigaciones para determinar el estado base, esto es, la concentración de estos contaminantes antes del inicio de operaciones, las metodologías para la medición y reducción de estos riesgos, así como determinar la sensibilidad de la población y los posibles efectos a su salud, así como los posibles daños a los ecosistemas que en ellas se encuentran.

VI. BIBLIOGRAFÍA

- ARTHUR, J. D. (2008), “Evaluating the Environmental Implications of Hydraulic Fracturing in Shale Gas Reservoirs”, *All Consulting*, en <http://www.all-llc.com/publicdownloads/ArthurHydrFracPaperFINAL.pdf>.
- AGENCIA DE SEGURIDAD, ENERGÍA Y AMBIENTE, presentación de la ASEA, “Principales características”, diciembre de 2014, en <http://www.semarnat.gob.mx/sites/default/files/documentos/presentacionasea.pdf>.
- BLACKWILL, Robert (2014), “La revolución del ‘shale’ y el poder de Estados Unidos”, *Política Exterior*, España, núm. 158, marzo-abril de 2014.
- CÁRDENAS GARCIA, Jaime (2015), “La nueva legislación secundaria en materia energética”, *Boletín Mexicano de Derecho Comparado*, México, núm. 143.
- CAULTON, Dana R. (2014), “Toward a Better Understanding and Quantification of Methane Emissions from Shale Gas Development”, *PNAS*, vol. 111, núm. 117.
- COMMITTEE ON CLIMATE CHANGE, (2014), “Does the IPCC Endorse Shale Gas?”, Published: April 17, en <http://www.theccc.org.uk/blog/does-the-ippcc-endorse-shale-gas/>.
- EMBRID TELLO, Antonio (2010), *Precaución y derecho. El caso de los campos electromagnéticos*, Madrid, Iustel.
- ELLSWORTH, William L., “Injection-Induced Earthquakes”, *Science*, 2013, vol. 341, 6142.
- ESTEVE PARDO, José, “Principio de precaución. El derecho ante la incerteza científica”, *Revista Jurídica de Catalunya*, vol. 102, núm. 3.
- (coord.), (2008), “La intervención administrativa en situaciones de incertidumbre científica. El principio de precaución en materia ambiental”, en *Derecho del medio ambiente y administración local*, Fundación Democracia y Gobierno Local.
- ESTRADA, Javier H. (2013), *Desarrollo del gas de lutita (Shale Gas) y su impacto en el mercado energético de México. Reflexiones para Centroamérica*, México, Naciones Unidas-CEPAL.
- EUROPEAN PARLIAMENT (2011), *Impacts of Shale Gas and Shale Oil Extraction on the Environment and on Human Health*.
- (2012), *Impacts of Shale Gas Extraction on the Environment and on Human Health-2012 Update Study*.
- GALLEGOS, Tanya *et al.* (2015), “Hydraulic Fracturing Water use Variability in the United States and Potential Environmental Implications”, *Water Resources Research*, vol. 51.

- GROAT, Charles G. (2012), “Fact-Based Regulation for Environmental Protection in Shale Gas Development. A Report”, *Energy Institute, the University of Austin*, Texas.
- HANSEN, J. (2015), “Ice Melt, sea Level Rise And Superstorms: Evidence from Paleoclimate Data, Climate Modeling, and Modern Observations that 2°C Global Warming is Highly Dangerous”, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, núm. 15.
- HEINBERG, Richard (2014), Fracking, *el bálsamo milagroso*, Barcelona, Icaria.
- HOWARTH, Robert W. *et al.* (2011), “Methane an the Greenhouse-Gas Footprint of Natural Gas from Shale Formations”, A letter, *Climatic Change*.
- HULTMAN, Nathan (2011), “The Greenhouse Impact of Unconventional Gas for Electricity Generation”, *Environ. Res. Lett.*, núm. 6.
- JACKSON, Robert B. (2011), “Research and Policy Recommendations for Hydraulic Fracturing and Shale-Gas Extraction”, *Center on Global Change*, Durham, Duke University.
- (2014), “The Environmental Costs and Benefits of Fracking”, *Annual Review of Environment and Resources*, 39, 7.1-7.36, en http://www.eenews.net/assets/2014/09/16/document_ew_02.pdf.
- JALIFE-RAHME, A. (2014), “Bajo la lupa”, *La Jornada*, México, abril 14.
- LAN, Ren (2014), “Hydraulic Fracture Extending into Network in Shale: Reviewing Influence Factors and Their Mechanism”, *The Scientific World Journal*, vol. 2014, Article ID 847107.
- LEES, Zachary (2012), “Anticipated Harm, Precautionary Regulation and Hydraulic Fracturing”, *Vermont Journal of Environmental Law*, vol. 13.
- OLMSTEAD, Sheila M., “Shale Gas Development Impacts on Surface Water Quality in Pennsylvania”, *PNAS*, 2013, vol. 110, núm. 13.
- OSBOM, Stephen G. (2011), “Methane Contamination of Drinking Water Accompanying Gas-Well Drilling and Hydraulic Fracturing”, *PNAS*, vol. 108, núm. 20.
- PETRÓLEOS MEXICANOS (2013), *Principales fundamentos del Programa de Acción Climática de Petróleos Mexicanos y sus organismos subsidiarios*, Mexico, Pemex.
- RODRÍGUEZ, G. (2013), *Air Emissions Characterización and Management for Natural Gas Hydraulic Fracturing Operations in the United States*. A graduate master project report, University of Michigan.
- SECRETARÍA DE ENERGÍA (2013), *Estrategia Nacional de Energía 2013-2027*, México.
- SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES (2015), *Guía de criterios ambientales para la exploración y extracción de hidrocarburos contenidos en lutitas*, México.

- STEPHENSON, Trevor (2011), “Modeling the Relative GHG Emissions of Conventional and Shale Gas Production”, *Environmental Science & Technology*, 45.
- THORNTON, Joe (2003), “Chemicals Policy and the Precautionary Principle, The Case of Endocrine Disruption”, en TICKNER, Joel A. (ed.), *Precaution, Environmental Science and Preventive Public Policy*, Island Press.
- UNITED STATES ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION (2014), *Today in Energy, Shale oil an shale gas resources are globally abundant*, January, 2, en <http://www.eia.gov/todayinenergy/detail.cfm?id=14431>.
- URRESTI, Aitor (2012), “Fracking: una fractura que pasará factura”, *Ecología Política*, núm. 43.
- VAN DER MUDE, Alana (2011), “Endocrine-Disrupting Chemicals: Testing to Protect Future Generations”, *Environmental Affairs Law Review*, 509, en <http://lawdigitalcommons.bc.edu/ealr/vol38/iss2/13>.