

CAPÍTULO XIII

FRACKING Y CAMBIO CLIMÁTICO

María de las Nieves CARBONELL LEÓN*

SUMARIO: I. *Introducción*. II. *Expansión de las reservas de hidrocarburos y cambio climático*. III. *Fractura hidráulica en yacimientos no convencionales*. IV. *Tecnología de fractura hidráulica y cambio climático*. V. *Fractura hidráulica en México y cumplimiento de compromisos internacionales*. VI. *Conclusiones*. VII. *Bibliografía*.

I. INTRODUCCIÓN

El cambio climático es uno de los grandes problemas que la humanidad afronta colectivamente y “representa una amenaza creciente para los ecosistemas, así como para las infraestructuras, los asentamientos, los procesos productivos, la salud pública y otros factores que afectan al desarrollo” (Tudela, 2015: 8), de tal suerte que, si no se hace nada para detenerlo o controlarlo, se prevén consecuencias catastróficas para la vida del hombre sobre la tierra.

El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés),¹ en su último informe de evaluación,² señaló: “Las nuevas evidencias confirman que el calentamiento del sistema climático es inequívoco... la temperatura del aire sobre la superficie terrestre y oceánica, como

* Química por la Facultad de Química de la UNAM, con especialidad en Gestión y Análisis de Políticas Ambientales. Es jubilada de Pemex con 31 años de experiencia en el área ambiental. Actualmente, es consultora del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo para la Actualización del Inventario Nacional de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero como parte de la Sexta Comunicación de México ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.

¹ Se trata de un panel de expertos constituido por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y la Organización Meteorológica Mundial, galardonado con el Premio Nobel de la Paz en 2007.

² Quinto Informe de Evaluación del IPCC, 2014.

promedio global, experimentó un aumento de 0.85 °C durante el período 1889-2012” (Pichs, 2015: 12).

De acuerdo con este informe, la influencia humana en el sistema climático es cada vez más clara y se debe al aumento en la concentración de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera,³ que es consecuencia del incremento de la extracción, producción y uso de combustibles fósiles, como carbón, petróleo y gas, para la obtención de energía.

A finales de 1980 y principios de 1990 comenzó a hacerse evidente que los suministros de estos combustibles fósiles, en especial petróleo y gas natural “convencionales”,⁴ estaban llegando a su límite (Heinberg, 2014: 57).

Mientras los expertos predecían el fin de la era de los hidrocarburos, responsables del calentamiento global, Estados Unidos sorprendió al mundo por el rápido aumento de su producción de aceite y, especialmente, de gas natural proveniente de yacimientos no convencionales,⁵ esto es, yacimientos de *shale* o de lutitas (Estrada, 2013: 7), que se tornaron económicamente viables gracias a los avances tecnológicos en perforación horizontal y fracturación hidráulica de altos volúmenes, de tal suerte que han revolucionado las perspectivas energéticas de América del Norte (Estrada, 2013: 31), con las consiguientes repercusiones en la disminución del precio de combustibles y el aumento en las reservas de hidrocarburos.

“Este desarrollo ha crecido junto con la oferta de petróleo y de condensados de gas natural” (Estrada, 2013: 7) y, por tanto, la amenaza de aumento de emisiones de bióxido de carbono y, en consecuencia, el incremento de la temperatura media global del planeta.

El presente trabajo tiene como objetivo analizar el impacto que el desarrollo y exploración de los combustibles no convencionales, en especial el *shale gas*, tiene y tendrá sobre el sistema climático en dos vertientes principales: la primera es que al aumentar las reservas mundiales de hidrocarburos se fomenta la política extractivista neoliberal y un modo de producción basado en el exacerbado consumo de combustibles fósiles, y, por ende, se retra-

³ Los gases de efecto invernadero (GEI) son componentes gaseosos de la atmósfera, naturales y resultantes de la actividad humana, que absorben y emiten radiación infrarroja, causantes del efecto invernadero y del aumento de la temperatura media global de la atmósfera.

⁴ Un yacimiento convencional es aquel donde hidrocarburo libre está atrapado en múltiples y pequeñas zonas porosas, y las fuerzas de flotabilidad lo mantienen en el lugar por debajo de una roca de cubierta que actúa como sello. Las características del yacimiento y fluidos de los yacimientos convencionales permiten que el petróleo o el gas natural fluyan con facilidad hacia el interior de los pozos perforados durante la exploración y la extracción (Ramsey, s.a.).

⁵ Los recursos no convencionales son aquellos hidrocarburos que están contenidos en formaciones que requieren de técnicas especiales de explotación y, por tanto, podrían demandar mayores inversiones en comparación con la explotación de recursos convencionales (Sener, 2017: 20).

sa la necesaria descarbonización de la economía y el desarrollo y adopción de energías renovables, y la segunda es la contribución directa e indirecta de esta tecnología en la mayor emisión de GEI en comparación con la explotación convencional.

II. EXPANSIÓN DE LAS RESERVAS DE HIDROCARBUROS Y CAMBIO CLIMÁTICO

Las emisiones antropogénicas de GEI han aumentado desde la era preindustrial, en gran medida como resultado del crecimiento económico y demográfico y del uso intensivo de combustibles fósiles producidos, principalmente, de la explotación de yacimientos de petróleo y gas.

Desde finales del siglo XIX y principios del siglo XX ha prevalecido la idea de la posibilidad de un crecimiento económico basado en el uso de combustibles fósiles ilimitado a una

...forma particular de cornucopianismo, que postula(ba) la posibilidad de que un sistema específico de medios tecnológicos sostendría el aumento ilimitado de las fuerzas productivas. La supuesta existencia de oportunidades para un desarrollo ilimitado de estos recursos (energéticos) podría verse como una derivación de la ideología de omnipotencia de la ciencia y la tecnología, que a su vez sería la ideología del progreso (Schoijet, 2008: 46).

Como producto de esta era de bonanza energética, entre 1750 y 2011, las emisiones a la atmósfera acumuladas de GEI fueron de $2,040 \pm 310$ Gt de bióxido de carbono (IPCC, 2014: 5).

A pesar del creciente número de políticas de mitigación del cambio climático, las emisiones antropógenas de gases de efecto invernadero en 2010 alcanzaron la cifra de 49 ± 4.5 GtCO₂e/año. Las emisiones de CO₂ procedentes de la combustión de combustibles fósiles y los procesos industriales contribuyeron en torno al 78% del aumento total de emisiones (IPCC, 2014: 5).

Asimismo:

...en ausencia de esfuerzos adicionales para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero más allá de los existentes en la actualidad, se esperaría un aumento de las emisiones impulsado por el crecimiento de la población global y las actividades económicas y por ende, un incremento en las temperaturas medias globales en la superficie de entre 3.7 °C y 4.8 °C para 2100 en comparación con los niveles preindustriales (Pichs, 2015: 17).

Esto representa un aumento de temperatura muy superior al comprometido en la 21a. Conferencia de las Partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, celebrada en París en diciembre de 2015, que señala como objetivo a largo plazo el mantener el aumento de la temperatura media mundial por debajo de los 2 °C sobre los niveles preindustriales y realizar esfuerzos para limitar este aumento a 1.5 °C, con la finalidad de reducir los riesgos y el impacto del cambio climático.

En su análisis del Quinto Informe de Evaluación del IPCC, la organización no gubernamental Greenpeace propone como parte de un plan de acción la

Eliminación progresiva de los combustibles fósiles: Para minimizar además del calentamiento, la acidificación de los océanos y para hacer frente a un empeoramiento de la realidad climática, los nuevos proyectos que utilizan de forma masiva el carbón, el petróleo y el gas deben ser detenidos y la mayoría de reservas de petróleo, carbón y gas natural aún sin explotar deben permanecer en el suelo. A mediados de siglo, las emisiones debidas a la quema de combustibles fósiles deben ser eliminadas. Ahora lo que se necesita es voluntad política que permita la transición hacia 100% renovables (Greenpeace, 2014: 4).

Además, Greenpeace señala que

...la propia Agencia Internacional de Energía ha reconocido que, para mantener el aumento de la temperatura global por debajo de los 2 °C, las nuevas reservas de combustibles fósiles deben permanecer en su sitio y los gobiernos, la industria energética y los inversores deben asumir este hecho en su toma de decisiones (2013: 5).

Los caminos de la mitigación para limitar el calentamiento por debajo de los 2 °C, advierte el IPCC, “requerirán reducciones sustanciales en las emisiones de GEI en las próximas décadas y prácticamente cero emisiones de CO₂ y otros gases de efecto invernadero de larga permanencia para finales del siglo XXI” (Delgado, 2016: 80). Así, de acuerdo con el IPCC, para lograr tal objetivo se requiere reducir las emisiones de GEI entre 40% y 70% a nivel mundial entre 2010 y 2050, y disminuirlas hasta un nivel cero o negativo en 2100 (IPCC, 2014: 21).

Para alcanzar la meta de los 2 °C, la Agencia Internacional de Energía ha propuesto una estrategia de cinco acciones, entre las que destacan un empuje mayor a la generación de energía renovable, el retiro progresivo de subsidios a los combustibles fósiles y la reducción de las emisiones de metano derivadas de la producción de petróleo y gas (Delgado, 2016: 85).

Gian Carlo Delgado nos aclara que

Aunque dichas medidas serían aparentemente suficientes para cumplir con la meta de los 2 °C, es nuevamente llamativo que estén ausentes acciones que trastoken estructuralmente a la industria petrolera-gasera y que podrían empujar con mayor ímpetu la transición energética, dígase por ejemplo, limitar al máximo la extracción y quema de carbón, dejar progresivamente una cuota de petróleo en el subsuelo y abandonar la apuesta de transición energética del carbón y petrolíferos al gas, como una vía para descarbonizar la matriz energética (2016: 85).

Una vuelta de tuerca se produjo en la cumbre One Planet, celebrada en París en diciembre de 2017, en la que el Banco Mundial anunció que a partir de 2019 dejaría de financiar las operaciones de exploración y producción de petróleo y gas, y en circunstancias excepcionales se analizaría la posibilidad de financiar este tipo de operaciones en los países más pobres, en los casos en que se generen beneficios claros para el acceso de los pobres a la energía y en proyecto se corresponda con los compromisos asumidos por el país en el Acuerdo de París (Banco Mundial, 2017).

No obstante, es evidente que, para las grandes compañías petroleras, cambiar sus patrones de producción o, en su caso, admitir “el agotamiento de sus recursos implica una desvalorización de su capital. Por ello, hay fuerzas (económicas y) sociales interesadas en mantener percepciones cornucopianas” (Schoijet, 2008: 49) y el constante crecimiento de sus niveles productivos. En síntesis, “la única forma realista de evitar el catastrófico cambio climático es la reducción drástica y rápida de nuestro consumo de combustibles fósiles” (Heinberg, 2014: 25).

La conciencia de los límites del crecimiento económico ligado al consumo de combustibles fósiles se produjo después de los trabajos de M. King Hubbert, quien “elaboró un modelo a partir del cual predijo que la producción (de petróleo) llegaría a un máximo en 1969, ello ocurrió en 1970” (Schoijet, 2008: 47).

“En la década de 1990 se publicaron trabajos que predecían que la producción mundial de petróleo y gas «convencional» llegaría a un máximo en 2015, 2020” (Schoijet, 2008: 54), y a partir de ese momento comenzaría a declinar, por lo cual la humanidad se vería forzada a dirigir su mirada hacia opciones de suministro de energía distintas, como la energía nuclear o las energías renovables, y, en caso de ser necesario, reducir el consumo energético a través de programas de eficiencia energética o transitar hacia un modelo de desarrollo de bajo consumo energético, o hasta pensar en una etapa de decrecimiento económico.

Sin embargo, arropada en la ideología de la omnipotencia de la ciencia y la tecnología, esta tendencia está siendo revertida por el uso de un nuevo método para la extracción de hidrocarburos, en especial de gas, conocido como “fracturación hidráulica de altos volúmenes” o *fracking* de campos, que antes permanecían como inaccesibles, denominados no convencionales, lo que ha dado lugar al llamado *boom* o revolución del *shale gas* o gas de lutitas y de aceite en los Estados Unidos. Se dice que el *fracking* está terminando con la dependencia estadounidense del petróleo importado y le aguardan cien años de gas natural barato. “En 2012 la producción de petróleo de Estados Unidos se disparó hasta 766,000 barriles diarios, el mayor crecimiento anual de la historia, al tiempo que la producción nacional alcanzó su nivel más alto en quince años” (Heinberg, 2014: 54).

De acuerdo con el reporte de 2014 de la U.S. Energy Information Administration, las reservas mundiales de gas natural en yacimientos de lutitas o *shale gas* de 46 países son de 7,576.6 trillones de pies cúbicos y 418.9 billones de barriles de aceite no convencional. “Entre 2005 y 2012, a pesar del aumento en la demanda, los precios del gas natural cayeron de 13 a 2 dólares estadounidenses por millón de unidades térmicas británicas (MBTU)” (Westphal y Dröge, 2013: 2).

Si las estimaciones de las reservas son correctas, la quema de todo ese petróleo y gas llevará a la destrucción del medio ambiente y, por supuesto, a la catástrofe climática.

Más aún, “muchos de los esfuerzos encaminados al desarrollo de las energías renovables se ven obstaculizados, hoy por hoy, por la falsa percepción de que hay suministros de gas natural barato a largo plazo” (Heinberg, 2014: 29). Mientras tanto, la industria de los combustibles fósiles está haciendo todo lo posible para convencernos de que no tenemos otra alternativa más que producir y consumir para mantener nuestra moderna forma de vida.

III. FRACTURA HIDRÁULICA EN YACIMIENTOS NO CONVENCIONALES

Para la explotación de los recursos no convencionales que se encuentran en cuencas de lutitas, se emplea la tecnología denominada “fractura hidráulica de altos volúmenes”, mejor conocida como *fracking*, la cual consta de perforaciones verticales y horizontales, realizadas en diferentes etapas, además del fracturamiento hidráulico (Semarnat, 2015: 6), última etapa para la que se utilizan grandes volúmenes de agua. “El propósito esencial de esta tecnología es abrir y mantener grietas en las rocas impregnadas de gas o aceite (petróleo

o kerógeno); estas grietas sirven para que los hidrocarburos migren 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 hidrocarburo; posteriormente, se perfora en forma horizontal y después se realizan varias etapas de fracturamiento, utilizando un fluido de fracturación, el cual es bombeado a una presión suficiente para romper la roca impermeable, 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 de gas y aceite y, por lo tanto, mayor el factor de recuperación.

Después de que el pozo se fractura, se tiene que hacer un “bombeo inverso” para retirar el agua y los fluidos del *fracking*; entre 25% y 90% de los fluidos de fracturación residuales retornan a la superficie para su almacenamiento y posterior tratamiento y/o disposición. A esto se le denomina “manejo del agua de retorno”.

Los yacimientos no convencionales tienen tres características comunes: contenido energético bajo con respecto al volumen de la roca, dispersión de yacimientos en áreas muy extensas y permeabilidad muy baja. Su viabilidad económica suele ser incierta debido al bajo contenido de gas o aceite en las rocas. El volumen extraído por pozo es muy inferior al de yacimientos convencionales (Estrada, 2013: 16).

También los yacimientos no convencionales presentan una tasa alta de declive por pozo, por lo que se requiere perforar un mayor número de pozos para lograr el mismo nivel de producción de la extracción convencional.

TABLA 1
COMPARACIÓN ENTRE YACIMIENTOS
CONVENCIONALES Y NO CONVENCIONALES

Requerimientos técnicos en recursos convencionales y no convencionales		
	Convencional	No convencional
Trayectoria del pozo tipo	Vertical	Horizontal
Longitud de la perforación (metros)	2,500-3,500	> 4,000
Tiempo en perforación y terminación (días promedio)	165	208
Costo de la perforación (MMDls)	2-5	6-15
Productividad media (MMpcd)	0.6	0.3
Número de pozos para alcanzar una producción de 1,000 MMpcd	1,650	3,300

FUENTE: Sener, con datos de Pemex.

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

Además, el desarrollo de los yacimientos no convencionales por fracturación hidráulica y la expansión de las reservas de hidrocarburos conllevan la preservación de un modelo económico altamente dependiente de los combustibles fósiles, en detrimento de las energías renovables, como se expuso más arriba; son muchas las formas en que esta tecnología incide sobre el sistema climático, a saber:

- a) El metano, componente principal del *shale gas*, tiene mayor potencial de calentamiento global que el bióxido de carbono.
- b) Una mayor cantidad de energía empleada para su desarrollo en comparación con la extracción convencional, y un aumento de emisiones de bióxido de carbono.
- c) Venteo y envío a quemador de corrientes de gas; emisiones de metano, bióxido de carbono, óxido nitroso y carbono negro.
- d) Emisiones fugitivas de metano desde la exploración y perforación hasta la terminación y producción de pozos.
- e) Emisiones fugitivas de metano durante el manejo del agua de retorno.
- f) Emisiones de metano a la atmósfera por la operación de la infraestructura complementaria, como ductos de recolección, estaciones de compresión, y emisiones de bióxido de carbono y óxido nitroso por las operaciones de preparación del fluido de fracturación, bombeo de grandes volúmenes de agua y manejo del fluido de retorno y residuos.
- g) Disminución de sumideros de carbono por cambio de uso de suelo.

IV. TECNOLOGÍA DE FRACTURA HIDRÁULICA Y CAMBIO CLIMÁTICO

1. *Potencial de calentamiento global*

Desde hace tiempo, se ha considerado al gas natural como un combustible de bajas emisiones de carbono⁶ y como una alternativa al uso de productos fós-

⁶ El gas natural es el que tiene el más bajo contenido de carbono de todos los combustibles fósiles y, por tanto, las más bajas emisiones de bióxido de carbono durante su combustión.

siles, tanto sólidos —por ejemplo, el carbón— como líquidos —por ejemplo, el diésel o el combustóleo—.

Incluso, las grandes petroleras han propagado la idea de que ésta es 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 disminuir 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.

En la Quinta Evaluación 2014 del IPCC publicada en 2014, el Grupo III presentó 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).

Esta alternativa es falaz, tomando en cuenta que el metano proveniente del manejo del gas natural sin combustionar tiene 28 veces mayor potencial de calentamiento global⁷ que el bióxido de carbono que se produce durante la combustión, lo que en un horizonte de 100 años no sólo compensa, sino que supera con creces los posibles beneficios de la disminución de la huella de carbono por su uso como sustituto de combustibles fósiles sólidos o líquidos. Es importante establecer el potencial de calentamiento global en relación con un periodo, porque el ciclo de vida atmosférico de los GEI varía considerablemente: el bióxido de carbono puede permanecer en la atmósfera de 50 a 200 años, mientras que el metano puede durar de 10 a 15 años.⁸

Para los cálculos de inventarios de GEI se ha convenido utilizar el potencial de calentamiento global del metano a 100 años, que es igual a 28, debido a que el Acuerdo de París establece que la temperatura media global del planeta no debe sobrepasar los 2 °C de la línea base preindustrial, aunque es conveniente tomar como referencia el potencial de calentamiento global del metano a 20 años, que es de 86, por lo que es aún más contundente la afirmación de que el gas natural, y en especial el extraído mediante *fracking*, no puede ser el combustible fósil que sirva de puente para reducir los efectos adversos al clima en los próximos años en lo que se lleva a cabo la transición energética.

⁷ Algunos GEI absorben la radiación con más efectividad que otros. Para tener en cuenta las diferencias en la absorción se utiliza el concepto de potencial de calentamiento global (PCG), en el que todos los gases se comparan con el bióxido de carbono, al que se le asigna un potencial de calentamiento global de uno. En un periodo de 100 años, el metano tiene un potencial de calentamiento global 28 veces mayor al bióxido de carbono; esto significa que una tonelada de metano absorbe la misma cantidad de radiación que 28 toneladas de bióxido de carbono.

⁸ “Medición de los gases invernadero”, disponible en: https://ec.europa.eu/clima/sites/campaign/pdf/measuring_gases_es.pdf.

2. *Menor tasa de retorno energético*

La producción de cualquier combustible requiere siempre cierta inversión energética, que se mide o reporta bajo el concepto de tasa de retorno energético (TRE). Gran parte de la energía empleada para producir un combustible se genera mediante procesos de combustión, o bien se pierde por emisiones fugitivas de los hidrocarburos; por tanto, durante los procesos de extracción de petróleo y gas forzosamente se generan GEI (Estrada, 2013: 16).

La producción de hidrocarburos por pozo perforado es menor en yacimientos no convencionales que en los convencionales, y es también mayor el número de operaciones a realizar, ya que además de la perforación vertical se requiere realizar la perforación en multietapas y, posteriormente, el fracturamiento hidráulico para ponerlos en producción; por tanto, la TRE es menor en la explotación no convencional, esto es, consume mayor cantidad de energía, generalmente proveniente de combustibles fósiles por unidad de combustible producido. Debemos recordar, como se plasma en la tabla 1, que se requiere la perforación del doble de pozos no convencionales para alcanzar el mismo nivel de producción.

3. *Aumento en la quema y venteo de metano*

En la época del *boom* de la explotación de aceite de *shale* o lutitas en el estado de Texas aumentó considerablemente la combustión de gas en quemadores,⁹ debido a que, una vez perforado el pozo, no se cuenta con la infraestructura para la recolección, conducción y aprovechamiento del gas.

Un reporte de la organización Earthworks de 2014 registró que el número de permisos de envío a quemador en Texas se incrementó de 107 en 2008 a 3,000 en 2013 (Horwith, 2014: 6). En el mismo año se emitieron aproximadamente 3.5 billones de libras de bióxido de carbono¹⁰ provenientes únicamente de la formación de Eagle Ford Shale, la cual continúa en territorio mexicano como la cuenca de Burgos. Esta cantidad es similar a la que emitirían 350,000 vehículos automotores (Miller, 2015: 4).

⁹ Ponencia dictada por la maestra María Eugenia Calderón Porter, de la Texas A&M International University, en el Instituto de Investigaciones Jurídicas de la UNAM, Diploma de Energía, 16 de noviembre de 2016.

¹⁰ “3.5 billions pound of carbon dioxide” equivalen a 1,587,600 toneladas de bióxido de carbono.

De acuerdo con un reporte de la U.S. Environmental Protection Agency de 2010, el bióxido de carbono generado por la quema de gas natural durante la perforación y la operación de un pozo convencional es de alrededor de 22.5 y 1.5 toneladas por año, respectivamente, mientras que las cantidades correspondientes a pozos no convencionales son superiores y del orden de 5,621 en cada una de las etapas (Hultman *et al.*, 2011: 1-9).

La combustión de gas recién salido del pozo, el cual probablemente arrastra líquidos del gas natural, genera hollín o carbono negro, un compuesto de efecto invernadero de vida corta cuyo potencial de calentamiento global es de 3,200 a 20 años y de 900 a 100 años; cabe aclarar que se tiene un elevado nivel de incertidumbre con respecto a estos valores.¹¹ Como se mencionó en el párrafo anterior, el volumen de gas enviado a quemador es notablemente superior en el caso de la extracción de yacimientos no convencionales, por lo que la generación de carbono negro también lo es.

4. Emisiones fugitivas

Respecto a la contribución de emisiones fugitivas procedentes de la exploración y explotación de lutitas, 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 fracturación hidráulica o *fracking*, han concluido que existen serios problemas para controlar estas emisiones de metano y que éstas son mayores y más probables en los sistemas no convencionales de producción que en los convencionales.

En la práctica es muy complicado estimar las emisiones fugitivas de cualquier industria o actividad. Los estudios existentes en el caso que nos ocupa están generalmente basados en los inventarios nacionales de emisiones, pero es difícil separar las emisiones de yacimientos convencionales de las no convencionales; por ello, es necesario desarrollar modelos que tomen en cuenta operaciones comunes de ambos tipos de explotación y así estimar las diferencias (Stephenson, 2011: 10757).

Mientras que en los yacimientos convencionales las emisiones fugitivas se presentan únicamente durante la perforación del pozo, en el caso de los no convencionales, además de las emisiones provenientes de la perforación, se deben considerar las emisiones fugitivas emitidas durante la etapa de fracturación y las del tratamiento del agua de retorno. Stephenson y su equipo —siguiendo este modelo— estimaron que, desde el pozo hasta el punto de

¹¹ “La importancia del carbono negro en el calentamiento global”, disponible en: http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe15/tema/recuadros/recuadro5_4.html.

consumo del combustible, la producción de *shale gas* tiene una intensidad de emisiones fugitivas de metano de 1.8-2.4% superiores a las de la producción convencional. Esta evaluación excluye el aumento de emisiones por cambio de uso de suelo (Stephenson, 2011: 10762).

Por su parte, Jiang *et al.* publicaron los resultados de la estimación de las emisiones de GEI del campo de gas Shale Marcellus, las cuales son sólo un 3% superiores a las emisiones promedio de la producción de gas convencional en Estados Unidos durante 2008 (2011: 8).

En abril de 2011, Robert W. Howarth publicó el primer estudio contrastado y revisado de la huella de GEI del *shale gas* y concluyó que entre el 3.6% y el 7.9% de la producción de metano a partir del aprovechamiento de *shale gas* escapa a la atmósfera en venteos y fugas durante todo el ciclo de vida de un pozo contra 1.7-6.0% en la extracción convencional (Howarth *et al.*, 2011: 683).

TABLA 2

COMPARATIVO DE EMISIONES FUGITIVAS DE METANO
ASOCIADAS A LA OBTENCIÓN DE GAS NATURAL EN POZOS
CONVENCIONALES Y DE FORMACIONES DE LUTITA,
EXPRESADAS EN PORCENTAJE DE METANO PRODUCIDO

	<i>Pozos convencionales de gas</i>	<i>Pozos no convencionales de gas de lutitas</i>
Emisiones debidas a perforación y terminación de pozos	0.01%	1.9%
Emisiones totales (incluye operación, proceso, transporte y distribución)	1.7-6%	3.6-7.9%

FUENTE: elaboración propia a partir de datos de Howarth *et al.*, 2011.

Nathan Hultman y su equipo de la Universidad de Maryland analizaron el ciclo de vida de la generación de electricidad a partir de gas convencional, *shale gas* y carbón, y encontraron que las emisiones de GEI en no convencionales son 11% superiores que las del gas convencional (Hultman *et al.*, 2011: 1).

A mayor número de componentes de un sistema productivo, tales como válvulas, uniones, bridas, etcétera, mayor probabilidad existe de que se presenten emisiones fugitivas de metano y de compuestos orgánicos volátiles, y

éste es el caso de la tecnología de *fracking*, que es más compleja e involucra un número mayor de componentes; además, requiere de una gran cantidad de instalaciones, tanto de producción como adicionales, esto es, mayor número de pozos productivos y, por tanto, mayor requerimiento de ductos de recolección y la infraestructura relacionada.

La mayor cantidad de emisiones ocurre durante el retorno de los fluidos de fracturación y el retiro de barrenas y tapones, ya que, como es sabido, para la fracturación, grandes volúmenes de agua son forzados a entrar bajo presión en la rocas de lutitas y fracturarlas y refracturarlas, y una cantidad significativa de esa agua que retorna a la superficie está acompañada de grandes cantidades de metano que escapan como emisiones fugitivas (Hultman *et al.*, 2011: 1-9; Stephenson, 2011: 10760; Caulton *et al.*, 2014: 6237-6242).

Los pozos abandonados de petróleo y gas son una fuente potencial de emisiones de metano a la atmósfera: mediciones directas de metano realizadas en 2013 y 2014 en pozos abandonados arrojaron valores desde 4.5×10^{-6} Kg de metano por día hasta 1.3×10^{-3} kg/d. Si lo escalamos al número de pozos abandonados existentes, estas emisiones pueden ser significativas; además, debemos tomar en cuenta el rápido agotamiento y abandono de los pozos de *shale gas* (Kang *et al.*, 2014: 18173).

5. Emisiones de metano durante el manejo de aguas de retorno

Si bien en este apartado nos referiremos, en estricto sentido, a emisiones fugitivas de metano, mención especial debe hacerse de aquellas que se producen durante el manejo, el transporte, el almacenamiento y el tratamiento del agua de retorno, así como a la liberación de metano a la atmósfera procedente de la extracción de agua contaminada de fuentes subterráneas.

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.

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.

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 presencia de metano y de hidrocarburos procedentes del yacimiento en mantos freáticos que puede llegar hasta cuerpos de agua superficiales y suelos, y de ahí a la atmósfera, se debe a que la fractura hidráulica 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 preexistentes 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, por ejemplo, el control de la presión del fluido, su viscosidad y la escala de fracturamiento (Lan *et al.*, 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 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 la evolución de las fracturas antes referidas, durante las actividades de fracturamiento hidráulico, pero también existe probabilidad de contaminación del agua de retorno con metano durante la perforación y el retorno del fluido.

Además de estas emisiones, para evaluar su efecto en el sistema climático debe efectuarse el análisis del ciclo de vida de la producción de hidrocarburos, en especial gas, provenientes de cuencas de lutitas e identificar todos los posibles impactos en el sistema climático.

6. *Emissiones fugitivas por la operación de infraestructura y actividades complementarias*

Por un lado, tenemos las emisiones fugitivas de metano procedentes de la infraestructura complementaria, como ductos de recolección, así como equipo de compresión para el manejo del gas, y, como ya se ha recalcado, al requerirse perforar un mayor número de pozos, esta infraestructura es más extensa y tiene un mayor número de componentes.

Asimismo, tenemos las emisiones de bióxido de carbono, óxido nitroso y metano procedentes de actividades complementarias propias de la fracturación hidráulica, como la generación de la energía requerida para la conducción, el bombeo de agua, la preparación del fluido de fracturación, su transporte al sitio del proyecto, el rebombeo a la superficie y el tratamiento de aguas residuales, además de la energía para la preparación, el manejo y el transporte de los compuestos químicos utilizados.

7. *Disminución de sumideros de carbono por cambio de uso de suelo*

La exploración y la explotación de yacimientos no convencionales tienen como consecuencia la disminución de la captura de GEI por la deforestación y retiro de capa vegetal de las grandes superficies que se requieren para la fracturación hidráulica, así como la apertura de nuevos campos para esta actividad.

Además de la superficie destinada para la perforación (*well pad*) de un mayor número de pozos, se requiere la apertura de caminos de acceso para cada uno de éstos, así como el desmonte y despalme para la construcción de infraestructura adicional, como ductos de recolección entre los pozos y estaciones de compresión para llevar el gas natural desde el pozo hasta los sistemas de tratamiento y ductos de transporte más cercanos, para su posterior aprovechamiento.

Si bien la cantidad total de superficie puede ser reducida gracias a la perforación múltiple en un solo pozo, debido a la gran cantidad de pozos requerida para la fractura hidráulica es importante el impacto que esto tiene en el uso de suelo (Zoback *et al.*, 2010: 12).

La capa vegetal que debe actuar como sumidero de carbono también puede ser mermada, ya que

...se han encontrado metales pesados tales como plomo, mercurio, cadmio, cromo, bario y arsénico en suelos cercanos a los sitios de perforación de (po-

zos) de gas natural. Y cuando el *fracking* provoca el aumento del ozono a ras de suelo las plantas resultan dañadas por la inhibición de la fotosíntesis y del desarrollo de las raíces...

Todos los problemas se multiplican por la necesidad de los operadores de *fracking* de conseguir tasas colosales de perforación, por lo tanto, de conseguir un enorme número de lugares en los que perforar (Heinberg, 2014: 117 y 119).

Como puede observarse en la tabla 1, el número de pozos en yacimientos no convencionales para alcanzar una cuota de producción es el doble del número de pozos que en el caso de convencionales, por lo que la superficie que impacta es mucho mayor. El campo Shale Marcellus ocupa un área de 160,934 km² en ocho estados de la Unión Americana (Carbonell, 2015: 198).

En el caso del estado de Colorado, a comienzos de 2012 se habían alquilado a la industria del petróleo y el gas aproximadamente 9,000 millas cuadradas de tierras públicas, más o menos el 10% de su superficie (Heinberg, 2014: 120).

Actualmente, se han identificado reservas de aceite y gas de esquisto en los estados de Coahuila, Nuevo León, Tamaulipas, San Luis Potosí, Querétaro, Veracruz, Hidalgo, Puebla, Oaxaca, Tabasco y Chiapas, con recursos técnicamente recuperables (Semarnat, 2015: 5). Petróleos Mexicanos (Pemex) se ha esforzado por estimar el potencial del país respecto a los recursos de gas natural; como resultado de estos esfuerzos, se ha identificado un área prospectiva de 43,000 km² (Anglés, 2015: 127).

La evaluación precisa de la superficie de suelo afectada y la pérdida de sumideros de carbono aún no se ha aplicado, ya que entraña un alto grado de complejidad por la gran cantidad de variables a considerar, como distancias, rutas de transporte, 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.

V. FRACTURA HIDRÁULICA EN MÉXICO Y CUMPLIMIENTO DE COMPROMISOS INTERNACIONALES

El 12 de diciembre de 2013 se aprobó en México la denominada “reforma energética”, cuyo propósito, según la Semarnat, es “promover la inversión en el sector bajo criterios de responsabilidad social y protección al medio ambiente” (Semarnat, 2015: 6). 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 busca maximizar la producción de hidrocarburos mediante la explotación de yacimientos en aguas profundas y cuencas de lutitas (*shale*) (Gobierno de la República, 2014: 3).

TABLA 3

PRODUCCIÓN DE PETRÓLEO Y GAS BAJO EL ESQUEMA
DE LA REFORMA ENERGÉTICA, DE ACUERDO
CON LA PRESIDENCIA DE LA REPÚBLICA

	2013	2018	2025
Petróleo mmbd*	2.5	3.0	3.5
Gas natural mmpcd**	5,700.0	8,000.0	10,400.0

* Millones de barriles por día.

** Millones de pies cúbicos por día.

FUENTE: Gobierno de la República, 2014: 3.

De conformidad con la evaluación, al 1o. de enero de 2017, los recursos petroleros prospectivos de México¹² se estiman en 112,834 mmbpce,¹³ de los cuales 52,629 mmbpce (47%) corresponden a recursos convencionales y 60,205 mmbpce (53%) a recursos no convencionales (Sener, 2017: 20).

En 2013, “el sector energético, (esto es) la producción de energía primaria totalizó 9,025.75 petajoules (PJ), con una aportación de los hidrocarburos de 88%, lo que convierte a éstos en la principal fuente de energía primaria del país” (INECC, 2015: 46). La producción total de hidrocarburos fue de 3,652 millones de barriles de petróleo crudo equivalente (Pemex, 2013a: 48) y Pemex Exploración Producción envió a la atmósfera 123.9 mmpcd de gas, considerando hidrocarburos y dióxido de carbono¹⁴ (Pemex, 2013a: 53), al intervenir en yacimientos convencionales, cantidad que puede verse multiplicada al aumentar el nivel de producción proyectado por la reforma si no se cuenta previamente con la infraestructura para el proceso y el aprovechamiento del gas natural procedente tanto de campos convencionales como no convencionales, así como por los trabajos de exploración y extracción de hidrocarburos en yacimientos no convencionales de lutitas, cuyas reservas

¹² Los recursos prospectivos representan el volumen de hidrocarburos estimado a una cierta fecha en acumulaciones que todavía no se descubren, pero que han sido inferidas y que se estiman potencialmente recuperables mediante proyectos de desarrollo futuros (Sener, 2017: 23).

¹³ Millones de barriles de petróleo crudo equivalente.

¹⁴ Venteo directo a la atmósfera o envío a quemador.

prospectivas, como ya se anotó líneas arriba, son superiores a las de los hidrocarburos convencionales.

La Ley General de Cambio Climático (LGCC), aprobada en 2012, establece como meta aspiracional la reducción de un 30% de las emisiones con respecto a la línea base para 2020 y alcanzar el 50% de las emisiones de 2000 a 2050,¹⁵ así como generar el 35% de electricidad a partir de energías limpias en 2024.¹⁶

Adicionalmente, México entregó a las Naciones Unidas, el 27 de marzo de 2015, sus Contribuciones Previstas y Determinadas a Nivel Nacional para el periodo 2020-2030, lo que implica compromisos de mitigación, que en la etapa pos-COP 21 adoptan el nombre de Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC, por sus siglas en inglés) (Muñoz, 2016: 57).

En ellas, nuestro país se compromete incondicionalmente, mediante medidas que llevará a cabo y solventará con recursos propios, a reducir el 22% de sus emisiones de GEI y el 51% de carbono negro para 2030 con respecto al escenario de línea base,¹⁷ y en el sector del petróleo y gas la meta es una reducción del 14% de las emisiones de GEI y 3% de carbono negro. “Esto sólo puede darse a través de acciones sectoriales transversales y que tengan como fin transitar a un desarrollo bajo en carbono y resiliente a los impactos del cambio climático” (Mendivil y Niño, 2016: 3).

“Este compromiso implica un pico de emisiones al 2026, desacoplando las emisiones de GEI del crecimiento económico: la intensidad de emisiones por unidad de PIB (se) reduce alrededor de 40% en el periodo del 2013 al 2030” (Gobierno de la República, 2013: 2).

Las NDC se aplicarán en el lapso 2020-2024 y tendrán que ser sustituidas por otras conforme al principio de progresividad para el segundo período quinquenal a partir del 2025, el incumplimiento de estos compromisos no deriva en ninguna penalidad más allá del desprestigio internacional (Delgado, 2016: 81).

Tomando en cuenta el aumento de producción propuesto en la reforma energética, el cual se prevé basado mayoritariamente en la explotación de

¹⁵ Artículo segundo transitorio de LGCC, *Diario Oficial de la Federación* del 6 de junio de 2012.

¹⁶ En la LGCC no se define el término “energías limpias”.

¹⁷ Escenario de línea base: *Business As Usual* de proyección de emisiones basadas en un crecimiento económico en la ausencia de políticas de cambio climático, tomando como punto de partida el inventario de 2013, primer año de ejecución de la LGCC. No existe evidencia de que en estos escenarios se haya considerado el aumento de emisiones derivado de la reforma energética.

las reservas en yacimientos no convencionales vía fracturación hidráulica de altos volúmenes o *fracking*, podemos predecir que será muy difícil que México cumpla con los compromisos de mitigación voluntarios no condicionados 2020-2030 que se formularon ante la Organización de las Naciones Unidas en la COP 21, alejando la posibilidad de cumplir con las metas aspiracionales de la LGCC, con lo que este ordenamiento corre el riesgo de convertirse en letra muerta.

Por su parte, el Programa de Acción Climática 2013, de la aún empresa de participación estatal mayoritaria Pemex, afirmaba:

En un esfuerzo por transitar hacia combustibles más limpios y por ende con menores emisiones, Pemex pone especial interés en la exploración y producción de yacimientos de gas convencional y no convencional. Por lo que se debe hacer lo necesario para transitar hacia el consumo de gas natural como una alternativa para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (Pemex, 2013b: 23).

Observamos así que muchos de los esfuerzos en materia energética y de mitigación del cambio climático, lejos de transitar hacia una descarbonización de la economía mediante el estímulo de energías renovables, están encaminados a seguir promoviendo el uso del gas natural y la explotación de yacimientos no convencionales.

Es necesario reconocer que, para ser coherentes con el papel proactivo que pretendemos asumir en materia de cambio climático y sustentabilidad, se requiere diseñar políticas públicas que incentiven el uso de energías renovables y avanzar en una efectiva descarbonización de la economía.

VI. CONCLUSIONES

Si la reducción de la producción y uso de combustibles fósiles es el camino para la reducción de emisiones de GEI y así paliar la catástrofe climática, es evidente que el camino de la fractura hidráulica no es el indicado, no sólo por su mayor incidencia en las emisiones de GEI, sino también porque invertir en la extracción de recursos energéticos mediante procedimientos no convencionales retrasa la transición energética a una matriz 100% renovable y sustentable.

El incremento en la producción y la reducción de costos logrados a partir de la explotación de yacimientos no convencionales, como los de *shale* o lutitas, lejos de fomentar la descarbonización de nuestra economía, aumentan la creciente dependencia de nuestro sistema energético de los combus-

tibles fósiles, en especial del gas natural, lo que contradice los principios y compromisos asumidos por nuestro país en materia de sustentabilidad y de mitigación de GEL.

Adicionalmente, las emisiones fugitivas, el venteo, la quema en antorcha, entre otras provenientes de componentes como válvulas, bridas, conexiones, etcétera, son significativamente más cuantiosas en la explotación no convencional que en la convencional; a esto hay que añadirle que se requiere un mayor uso de suelo, por lo que se reduce la captura de carbono por vegetación.

Ante esto, de continuar los planes del gobierno federal de licitar para su explotación mediante fractura hidráulica, campos de yacimientos no convencionales, se vislumbra difícil y hasta imposible que México pueda cumplir tanto con las metas establecidas en la LGCC como con los compromisos adquiridos en el Acuerdo de París de 2015.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- ANGLÉS, Marisol (2015), “Reforma energética y cambio climático. Algunos puntos de desencuentro”, en CÁRDENAS, Jaime (coord.), *Reforma energética. Análisis y consecuencias*, México, UNAM-Tirant lo Blanch.
- BANCO MUNDIAL (2017), “Anuncios del Grupo Banco Mundial en la cumbre One Planet”, disponible en: <http://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2017/12/12/world-bank-group-announcements-at-one-planet-summit>.
- CARBONELL, María de las Nieves (2015), “Impacto ambiental de la reforma energética dirigida al sector hidrocarburos”, *Marco constitucional para la soberanía nacional y energética*, México, Cámara de Diputados, Centro de Estudios Sociales y de Opinión Pública, disponible en: <http://www5.diputados.gob.mx/index.php/camara/Centros-de-Estudio/CESOP/Estudios-e-Investigaciones/Libros/Marco-constitucional-para-la-soberania-nacional-y-energetica>.
- CAULTON, Dana *et al.* (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?”, Reino Unido, 17 de abril, disponible en: <http://www.theccc.org.uk/blog/does-the-ipcc-endorse-shale-gas/>.
- DELGADO, Gian Carlo (2016), “COP21 y la transición hacia escenarios de bajo carbono: eficiencia, innovación tecnológica y cambio de paradigma”, en RUEDA ABAD, José Clemente *et al.* (coords.), *21 visiones de la COP21. El*

Acuerdo de París: retos y áreas de oportunidad para su implementación en México, México, UNAM, Programa de Investigación en Cambio Climático.

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.

GOBIERNO DE LA REPÚBLICA (2013), *Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018. Programa Especial de Cambio Climático 2014-2018*, México, disponible en: http://www.semarnat.gob.mx/sites/default/files/documentos/transparencia/programa_especial_de_cambio_climatico_2014-2018.pdf.

GOBIERNO DE LA REPÚBLICA (2014), *Reforma energética. Resumen ejecutivo*, México, disponible en: http://reformas.gob.mx/wp-content/uploads/2014/04/Resumen_de_la_explicacion_de_la_Reforma_Energetica11.pdf.

GREENPEACE (2013), “¿Qué dice el Informe del IPCC?”, disponible en: <http://www.greenpeace.org/mexico/Global/mexico/Docs/2013/Qué%20dice%20el%20IPCC.pdf>.

GREENPEACE (2014), “Quinto informe sobre cambio climático, impactos, adaptación y vulnerabilidad del Grupo de Trabajo II del IPCC”, España, disponible en: <http://ibdigital.uib.es/greenstone/collect/cd2/index/assoc/gp0190.dir/gp0190.pdf>.

HEINBERG, Richard (2014), *Fracking: el bálsamo milagroso*, Barcelona, Icaria.

HORWITH, Daniel (2014), “Up in Flames, U.S. Shale Oil Boom Comes at Expense of Wasted Natural Gas, Increased CO₂”, *Earthworks*, 11.

HOWARTH, Robert W. *et al.* (2011), “Methane an the Greenhouse-Gas Footprint of Natural Gas from Shale Formations”, *Climatic Change*, vol. 106, 4.

HULTMAN, Nathan *et al.* (2011), “The Greenhouse Impact of Unconventional Gas for Electricity Generation”, *Environ. Res. Lett.*, núm. 6.

INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA Y CAMBIO CLIMÁTICO (INECC) (2015), *Primer Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*, México, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC) (2014), *Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los grupos de Trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación*, Ginebra, disponible en: https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_es.pdf

JIANG, Mohan *et al.* (2011), “Life Cycle Greenhouse Emissions of Marcellus Shale Gas”, *Environ. Res. Lett.*, vol. 6.

KANG, Mary *et al.* (2014), “Direct Measurements of Methane Emissions form Abandoned Oil and Gas Wells in Pennsylvania”, *PNAS*, vol. 111, núm. 151, disponible en: www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1408315111.

- LAN, Ren *et al.* (2014), “Hydraulic Fracture Extending into Network in Shale: Reviewing Influence Factors and their Mechanism”, *The Scientific World Journal*.
- LEES, Zachary (2012), “Anticipated Harm, Precautionary Regulation and Hydraulic Fracturing”, *Journal of Environmental Law*, vol. 13.
- MENDÍVIL, Ana y NIÑO, Gabriela (2016), “Una política energética sustentable: un pendiente para México”, *Perspectivas*, núm. 1.
- MILLER, Clare (2015), “Texas Oil & Gas Flaring: A Report on Flaring, Permitting, and the Complaint Process in the Texas Oil & Gas Industry”, *Earthworks*, agosto, disponible en: https://earthworks.org/cms/assets/uploads/archive/files/publications/MEMO_TX-oil-gas-flaring.pdf.
- MUÑOZ, Gabriela (2016), “Contribuciones previstas y determinadas a nivel nacional (INDC)”, en RUEDA ABAD, José Clemente *et al.* (coords.), *21 visiones de la COP21. El Acuerdo de París: retos y áreas de oportunidad para su implementación en México*, México, UNAM, Programa de Investigación en Cambio Climático.
- OSBOM, Stephen G. (2011), “Methane Contamination of Drinking Water Accompanying Gas-Well Drilling and Hydraulic Fracturing”, *PNAS*, vol. 108, núm. 20.
- PICHS, Ramón (2015), “Prólogo”, en CRUZ, Xóchitl y DELGADO, Gian Carlo (coords.), *México ante la urgencia climática: ciencia, política y sociedad*, México, UNAM, Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades-Programa de Investigación en Cambio Climático.
- PEMEX (2013a), *Memoria de labores 2013*, México.
- PEMEX (2013b), *Plan de Acción Climática 2013*, México, disponible en: <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2011/CD001637.pdf>.
- RAMSEY, Mark (s.a.), *Schlumberger Oilfield Glossary*, disponible en: http://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/c/conventional_reservoir.aspx.
- SCHOIJET, Mauricio (2008), *Límites del crecimiento y cambio climático*, México, Siglo XXI Editores.
- SECRETARÍA DE ENERGÍA (SENER) (2017), *Programa Quinquenal de Licitaciones para la Exploración y Extracción de Hidrocarburos 2015-2019*, México, disponible en: <https://www.gob.mx/sener/acciones-y-programas/programa-quinquenal-de-licitaciones-para-la-exploracion-y-extraccion-de-hidrocarburos-2015-2019>.
- SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES (SEMARNAT) (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”, *Environ. Sci. Technol.*, vol. 45.
- TUDELA, Fernando (2015), “Cambio climático, un problema de todos”, *Foreign Affairs Latinoamérica*, vol. 15, núm. 4.
- WESTPHAL, Kirsten y DRÖGE, Susanne (2013), *¿Gas de esquisto para un mejor clima?: la revolución de la fractura hidráulica en Estados Unidos desafía la política climática europea e internacional*, Berlín, Stiftung Wissenschaft und Politik-Deutsches Institut für Internationale Politik und Sicherheit, disponible en: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0168-ssoar-437727>.
- ZOBACK, Mark *et al.* (2010), *Addressing the Environmental Risks from Shale Gas Development*, Worldwatch Institute, Briefing Paper 1.