

**ANÁLISIS DEL IMPACTO AMBIENTAL GENERADO POR LA EXTRACCIÓN DE  
GAS POR MÉTODOS NO CONVENCIONALES - *SHALE PLAYS* EN ESTADOS  
UNIDOS**

**KRUPSKAYA CONTRERAS GÓMEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS  
ESCUELA DE QUÍMICA  
ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA AMBIENTAL  
BUCARAMANGA  
2015**

**ANÁLISIS DEL IMPACTO AMBIENTAL GENERADO POR LA EXTRACCIÓN DE  
GAS POR MÉTODOS NO CONVENCIONALES - SHALE PLAYS EN ESTADOS  
UNIDOS**

**KRUPSKAYA CONTRERAS GÓMEZ**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de  
ESPECIALISTA EN QUÍMICA AMBIENTAL**

**Director**

**MARIANNY YAJAIRA COMBARIZA MONTAÑEZ**

**Química Ph.D.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

**FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS**

**ESCUELA DE QUÍMICA**

**ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA AMBIENTAL**

**BUCARAMANGA**

**2015**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco infinitamente a mi padre por impartir en mí el amor hacia la naturaleza. Asimismo manifiesto mi gratitud hacia Roberto por su orientación, a Sebastián por continua colaboración y a mi alma mater por ser fuente generadora de conocimiento.

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN	12
1. CONCEPTUALIZACIÓN SOBRE RECURSOS HIDROCARBUROS NO CONVENCIONALES	15
1.1 HIDROCARBUROS CONVENCIONALES	17
1.2 HIDROCARBUROS NO CONVENCIONALES	20
1.2.1 Shale Gas	21
1.2.1.1 Distribución Mundial	23
2. FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO COMO TÉCNICA DE EXTRACCIÓN DE RECURSOS NO CONVENCIONALES	27
2.1 CONCEPTUALIZACIÓN	30
2.2 ADITIVOS QUÍMICOS EMPLEADOS	34
3. ANÁLISIS DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES GENERADOS POR EL USO DEL FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO EN LOS ESTADOS UNIDOS	37
3.1 CONTAMINACIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS	41
3.2 CONTAMINACIÓN DEL AIRE	44
3.3 AUMENTO DE LA ACTIVIDAD SÍSMICA	46
3.4 OTROS IMPACTOS	49
4. COLOMBIA Y SU INCURSIÓN EN LA EXPLOTACIÓN DEL SHALE GAS	53
5. CONCLUSIONES	57

6. RECOMENDACIONES

59

BIBLIOGRAFÍA

60

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Consumo de recursos energéticos (en millones de toneladas equivalentes) desde 1989 hasta 2014.	16
Figura 2. Proceso de Formación del Petróleo	18
Figura 3. Pico de Hubbert	19
Figura 4. Muestra de Esquisto	22
Figura 5 Afloramiento de Roca Tipo Shale Gas, Parámetros mínimos para viabilidad comercial.	23
Figura 6. Principales Yacimientos de Shale en el Mundo.	24
Figura 7. Ubicación Geográfica de los prospectos de Shale más importantes de los Estados Unidos.	25
Figura 8. Recursos de los prospectos de Shale más importantes de los Estados Unidos.	26
Figura 9 Diagrama de la extracción por técnica de <i>Fracking</i>	28
Figura 10. Ciclo del agua empleada en el Fracking	29
Figura 11. Efecto de la arena en las fracturas en shale – plays.	30
Figura 12. Pad Multipozo para Desarrollo de Shale Plays	31
Figura 13. Comparación de consumo de agua por generación o extracción de diferentes recursos energéticos	34
Figura 14. Presuntos Impactos ambientales de la producción de Shale Gas	40
Figura 15. Casos de Sismicidad Inducida para diferentes eventos contra Magnitud.	47
Figura 16. Muro Temporal para Mitigar las Operaciones de Shale	50
Figura 17. Vaca Muerta en Caddo Parish, Louisiana	51
Figura 18. Cuencas prospectivas para Shale Gas dentro del territorio Colombiano.	54

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 Agentes químicos empleados en el <i>Fracking</i> .	35
Tabla 2. Riesgos de Compuestos Químicos asociados al Fracking	38
Tabla 3. Potencial de Cuencas Sedimentarias para Shale Gas en Colombia	55
Tabla 4. Características Geológicas de Cuencas Sedimentarias Prospectivas en Colombia	56

## RESUMEN

**TÍTULO:** ANÁLISIS DEL IMPACTO AMBIENTAL GENERADO POR LA EXTRACCIÓN DE GAS POR MÉTODOS NO CONVENCIONALES - SHALE PLAYS EN ESTADOS UNIDOS\*.

**AUTORES:** KRUPSKAYA CONTRERAS GÓMEZ\*\*.

**PALABRAS CLAVES:** *Shale Gas, Shale Plays*, Recursos No Convencionales, Impactos Ambientales, Fracturamiento Hidráulico, Contaminación.

### DESCRIPCIÓN:

La escasez los recursos energéticos convencionales, ha traído como consecuencia un creciente interés de la industria energética en fuentes de hidrocarburos no convencionales, dentro de las cuales encuentra el *shale gas* (también conocido como gas de esquisto). Este *shale gas* se encuentra contenido en yacimientos de *shale*, los cuales están compuestos de rocas sedimentarias de tamaño de grano más fino, y por consiguiente mucho menos permeables. Para poder extraer este recurso, se recurre a una técnica conocida como fracturamiento hidráulico o *Fracking*.

A pesar de sus grandes ventajas energéticas, el proceso de fracturamiento hidráulico supone grandes retos medioambientales y de salud pública. La escasa información relacionada con los impactos ambientales que acarrea el uso de técnicas como el *fracking*, ha provocado un amplio debate acerca de la evaluación de estos impactos. Debido a la prospección de este tipo de extracción en Colombia, se plantea la necesidad de estudiar los impactos en ecosistemas que presenten un amplio desarrollo de esta técnica. Este proyecto recopila los principales estudios relacionados con la contaminación asociada a operaciones de fracturamiento hidráulico en Norteamérica.

Dentro de los mecanismos de contaminación encontrados, se destaca principalmente la contaminación a los suelos de las áreas en donde se encuentra el recurso y a las fuentes de agua potable cercanas. Se sabe que se utilizan al menos 260 sustancias químicas como aditivos propantes que pueden actuar como agentes cancerígenos y mutágenos. También se evidencia que estas sustancias son capaces de contaminar el agua por fallas en los pozos y de migrar al subsuelo comprometiendo radicalmente fuentes hídricas cercanas y cultivos. Por último, se muestra la incidencia del fracturamiento hidráulico en la actividad sísmica de la región en donde se explota. Sin embargo, el consumo de agua asociado al *shale gas* no es tan excesivo como se podría creer.

---

\* Monografía de Especialización. Especialista en Química Ambiental.

\*\* Facultad de Ciencias Básicas. Escuela de Química, Directora Ph.D. Marianny Yajaira Combariza Montañez

## ABSTRACT

**TITLE:** ANALYSIS OF THE ENVIROMENTAL EFFECTS ASSOCIATED TO UNCONVENTIONAL GAS EXPLOITATION – SHALE PLAYS IN THE UNITED STATES<sup>\*</sup>.

**AUTHOR:** KRUPSKAYA CONTRERAS GÓMEZ<sup>\*\*</sup>.

**KEY WORDS:** Shale Gas, Shale Plays, Unconventional Resources, Enviromental effects, Fracking, Pollution.

### DESCRIPTION:

The shortage in conventional energetic resources has forced a rising interest on unconventional sources of energy, such as shale gas. This shale gas is contained among shale reservoirs, made of small-grains and low-permeability sedimentary rocks. In order to produce this resource, a technique known as Fracking is commonly used.

Despite the big energetic advantage, the fracking represents massive environmental and public health crisis. The lack of accurate information to describe the environmental effects in Colombia, contemplates the need of a national debate regarding their implications. Is necessary to study the environmental impairment in prospective ecosystems. This project complies the main studies related with pollution associated to fracking in North America.

Among the pollution mechanisms found, the soil contamination is one of the most mentioned, mainly in soils surrounding the resource and surrounding groundwater bodies. It is known that the additives used in fracking operations contain at least 260 chemical substances, which may act as carcinogen and mutagenic agent. Contamination to potable water is also documented in literature. This fracking substances may permeate groundwater bodies by faults in oil wells, migrating to surrounding areas and compromising the health and integrity of crops and populations. For last, it is shown the correlation between fracking and seismically activity on prospective regions. However, the water consumption associated to shale gas is not as excessive as is commonly believed.

---

<sup>\*</sup> Especialization Monography. Environmental Chemistry Specialist.

<sup>\*\*</sup>. Basic Sciences Faculty, Chemistry School, Director: Ph.D. Marianny Yajaira Combariza Montañez.

## INTRODUCCIÓN

La sociedad moderna depende del petróleo como fuente de energía para su funcionamiento. El petróleo es sin lugar a dudas, el recurso energético más importante para la humanidad. De la extracción de este recurso depende el funcionamiento de las economías globales, el transporte de recursos y el comercio de bienes y servicios. Sin embargo, al ser un recurso no renovable, la explotación de este recurso es cada vez más costosa. La industria de los hidrocarburos atraviesa un momento difícil, ya que los nuevos descubrimientos son cada vez más escasos, y en condiciones más inhóspitas, lo cual eleva el costo del barril. Este aumento continuo en la demanda, sumado a la incipiente dificultad de extracción del petróleo convencional amenaza con acabar con una de las fuentes de energías más eficientes conocidas por el hombre. La escasez de estos recursos energéticos convencionales, ha traído como consecuencia un creciente interés de la industria en fuentes de hidrocarburos no convencionales.

Estas fuentes de hidrocarburos son denominadas “no convencionales” debido a que no se encuentran en yacimientos típicos de areniscas o carbonatos, sino que se encuentran contenidos en diferentes arreglos geológicos, por lo que su explotación es considerada un reto para la industria. Dentro de las fuentes no convencionales de energía se encuentra el *shale gas* (también conocido como gas de esquisto). Este *shale gas* se encuentra contenido en yacimientos de *shale* (esquisto), los cuales están compuestos de rocas sedimentarias de tamaño de grano más fino, y por consiguiente mucho menos permeables. Para poder extraer este recurso, se recurre a una técnica conocida como fracturamiento hidráulico o *Fracking*.

En general, el mundo ha sufrido una verdadera revolución energética debido a la explotación de este recurso. En los Estados Unidos de América, para el año 2013, de los 24,4 Trillones de pies cúbicos de producción de gas seco en Estados Unidos, los yacimientos de *Shale Gas* aportaron el 46,5%. Algunos analistas predicen que este suplirá la mitad de la producción de Estados Unidos para el 2020 (Polczer, 2009), Se espera que para los años 2020, 2030 y 2040 su aporte aumente en un 58,5 %, 64,5% y 68,3% respectivamente (*Anual Energy Outlook 2015*).

Para la creación de canales de flujo en la puesta en producción de los yacimientos de *shale gas*, con el fin de generar una óptima geometría de fractura es necesaria la aplicación de presión hidrostática que resulte mayor a la presión generada por la formación, lo anterior acompañado de un material de soporte que cumplirá la función de mantener abiertas las fracturas, para de esta manera incrementar el área del canal de flujo. Este material de soporte consiste un aditivo químico denominado agente propante que se inyecta en la formación en grandes cantidades. Debido a su composición, este agente tiene el potencial de causar problemas graves o agudos a la salud de los operarios, a las instalaciones y al medio ambiente (Tollefson, 2012).

El proceso de fracturamiento hidráulico inició en 1947 y se realizaba en pozos verticales con bajos índices de productividad. Esta metodología se transformó en 1986 cuando se empezaron a hacer perforaciones de manera horizontal. La explotación a escala comercial de este recurso inicia en 1997, coincidiendo con la crisis del petróleo (Bowker, 2007). Sin embargo, no fue sino hasta inicios del siglo XXI que la explotación del gas de esquisto empezó a expandirse a lo largo del territorio estadounidense, alcanzando producciones realmente significativas.

A pesar de sus grandes ventajas energéticas, el proceso de fracturamiento hidráulico supone grandes retos medioambientales y de salud pública. (Jackson et

al., 2014). Este método de extracción causa una serie de impactos, principalmente a los suelos de las áreas en donde se encuentra el recurso y a las fuentes de agua potable cercanas. Se sabe que se utilizan al menos 260 sustancias químicas como aditivos propantes que pueden actuar como agentes cancerígenos y mutágenos. También se conoce que estas sustancias son capaces de contaminar el agua por fallas en los pozos y de migrar al subsuelo comprometiendo radicalmente fuentes hídricas cercanas y cultivos (Montoya et al, 2012).

La escasa información relacionada con los impactos ambientales y sociales que acarrea el uso de técnicas como el *fracking*, ha provocado un amplio debate acerca de la evaluación y minimización estos impactos. Debido a la expansión de este tipo de extracción en países de economías emergentes, como por ejemplo Colombia, se evidencia la necesidad de estudiar los impactos a los ecosistemas de países en los cuales exista un amplio desarrollo de esta técnica, como los Estados Unidos. Por estas razones en este documento se consigna el análisis de la información bibliográfica existente en bases de datos referenciales, disponibles para consulta en la biblioteca virtual UIS, sobre los impactos de *fracking* particularmente en el área geográfica de Estados Unidos; teniendo como objetivo principal que este documento sirva como fuente de consulta y posiblemente guía para futuras investigaciones en Colombia.

## **1. CONCEPTUALIZACIÓN SOBRE RECURSOS HIDROCARBUROS NO CONVENCIONALES**

Para poder comprender a plenitud los diferentes conceptos de los yacimientos de gas de esquisto, las causas y sus efectos de su explotación, es necesario inicialmente definir conceptos de recursos hidrocarburos convencionales. Esto con el fin de comprender las diferencias y similitudes que tiene este recurso en comparación a las fuentes de hidrocarburos convencionales, además de poder entender sus diferencias tanto a nivel químico-molecular, como a nivel de procesos de producción. Estos conceptos serán relevantes a la hora de discutir el impacto ambiental del gas de esquisto.

La energía existe en la naturaleza de tal forma que para que pueda ser usada, debe sufrir ciertos procesos de transformación. Las cantidades disponibles de estas fuentes de energía son lo que conocemos por recursos energéticos.

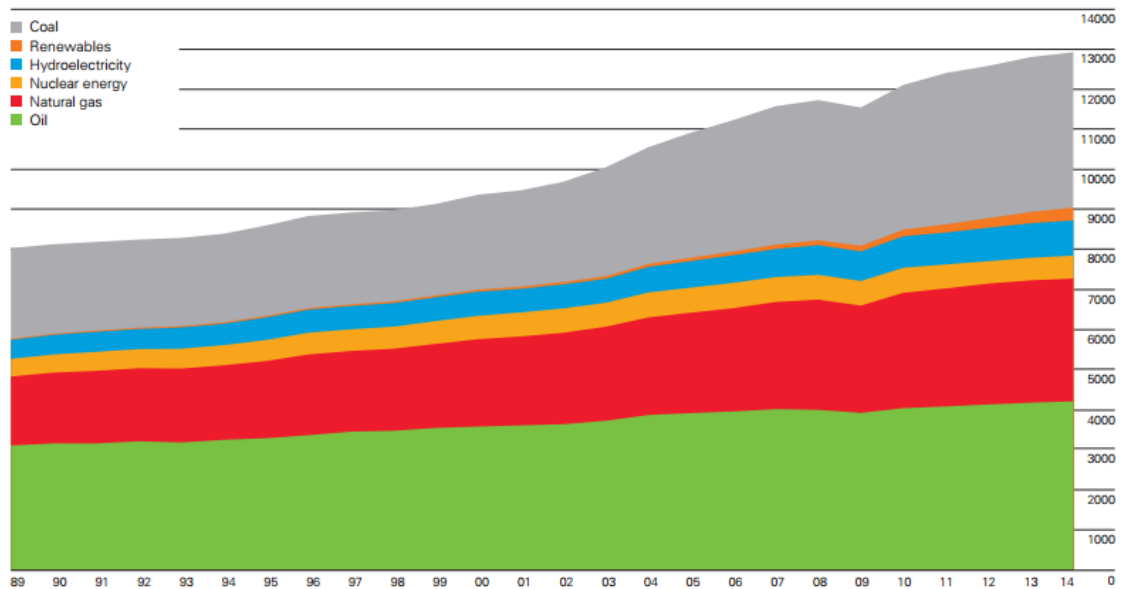
Las fuentes de energía se dividen en dos grupos:

- **Renovables:** Son aquellas que no se agotan tras la transformación energética. Como lo son la energía solar, eólica, oceánica, hidráulica, biomasa y geotérmica.
- **No renovables:** Son aquellas que se agotan al transformar su energía en energía útil. Ejemplo de ellos son los combustibles fósiles y nucleares.

El desarrollo económico de las principales naciones del mundo se ha basado en el uso de recursos naturales, entre los cuales los recursos energéticos juegan un rol fundamental. La importancia de los recursos energéticos para el desarrollo económico excede el reconocimiento de que la energía constituye la base material para el crecimiento (Beaudreau, 2005).

Desde la revolución industrial, el ser humano se ha puesto en la tarea de buscar mecanismos que le permitan obtener y explotar en su totalidad los recursos energéticos. A pesar de que se reconoce la importancia de desarrollar fuentes de energía renovables y ambientalmente sostenibles, según el registro estadístico anual de la BP (BP, 2015) las fuentes de energías más empleadas a nivel mundial siguen siendo el gas natural y el petróleo, por una amplia diferencia. Esto se debe a que el desarrollo tecnológico de las energías renovables todavía no ha podido equiparar la eficiencia energética de estos recursos no renovables. La **Figura 1** muestra el consumo anual de diferentes tipos de energía para desde el año 1989 hasta el 2014 en millones de toneladas equivalentes, en esta figura se hace evidente el peso de los recursos hidrocarburos, representados en la gráfica mediante los colores verde y rojo para el petróleo y el gas respectivamente.

**Figura 1. Consumo de recursos energéticos (en millones de toneladas equivalentes) desde 1989 hasta 2014.**



Fuente: BP Statistical Review, June 2015.

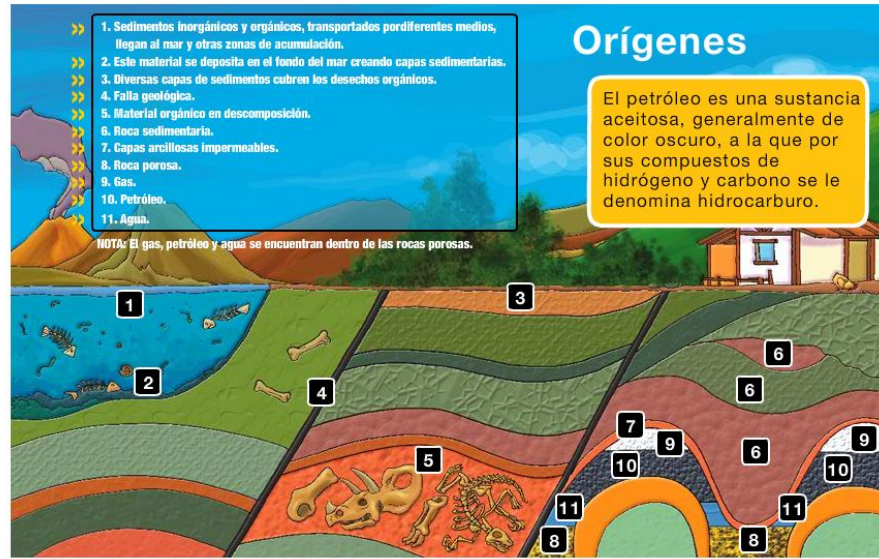
## 1.1 HIDROCARBUROS CONVENCIONALES

El petróleo se define como una mezcla de compuestos hidrocarburos de composición variable, la cual a condiciones atmosféricas se presenta como un líquido viscoso de color oscuro (variando en tonalidades de verde a negro). Ese hidrocarburo puede estar en estado líquido o en estado gaseoso. En el primer caso es un aceite al que también se le dice crudo. En el segundo se le conoce como gas natural.

Según la teoría más aceptada, el origen del petróleo –y del gas natural– es de tipo orgánico (material orgánico contenido en las rocas sedimentarias). Esa teoría enseña que el petróleo es el resultado de un complejo proceso químico-físico en el interior de la tierra, en el que, debido a la presión y las altas temperaturas, se produce la descomposición de enormes cantidades de materia orgánica que se convierten en aceite y gas. Esa materia orgánica está compuesta fundamentalmente por el fitoplancton y el zooplancton marinos, al igual que por restos vegetales y animales, todo lo cual se depositó, en el pasado, en el fondo de los grandes lagos y en el lecho de los mares.

Junto a esa materia orgánica y sobre ella se depositaron sucesivas capas de lodo, arena, arcilla y otros sedimentos, que fueron transportadas por los ríos, el viento y las mareas. Estos depósitos se compactaron conformando lo que geológicamente se conoce como “formaciones sedimentarias” o estratos de rocas sedimentarias. Entre esas capas sedimentarias se llevó a cabo el fenómeno natural que dio lugar a la creación del petróleo y el gas natural. Ese proceso de sedimentación y transformación duró varios millones de años. La **Figura 2** permite ejemplificar la teoría de formación orgánica, en la cual se puede observar como los organismos marinos se depositan en capas sedimentarias y forman lo que se conoce como petróleo hoy en día.

**Figura 2. Proceso de Formación del Petróleo**



Fuente: Ecopetrol, El petróleo y su Mundo.

En un comienzo las capas sedimentarias se depositaron en sentido horizontal. Pero los movimientos y cambios violentos que ha sufrido la corteza terrestre variaron su conformación y, por consiguiente, los sitios donde se encuentra el petróleo. Es por esto por lo que la geología identifica hoy varios tipos de estructuras subterráneas donde pueden encontrarse yacimientos de petróleo: anticlinales, estructuras falladas, trampas estratigráficas y domos salinos, entre otros.

En todo caso, el petróleo se encuentra ocupando los espacios de las rocas porosas, principalmente de rocas como areniscas y calizas, de manera similar a como el agua que empapa una esponja. (ECOPETROL, 2015)

Dado la característica principal de un recurso no renovable, el petróleo durante su explotación presenta un limitante en el ascenso, lo que se relaciona con el punto máximo de explotación. Cuando se llega al punto máximo de explotación se establece una pronta disminución en su disponibilidad de extracción. (Ferrari,



los cuales el metano corresponde del 90 al 99% de la mezcla. La composición química de los hidrocarburos gaseosos de origen natural y la del crudo son semejantes, es decir, ambos son resultado de una mezcla de diferentes hidrocarburos. El gas natural también tiene trazas de nitrógeno, vapor de agua, dióxido de carbono, ácido sulfhídrico y a veces gases inertes, como argón o helio. (*Energy Information administration*, 1996). La extracción y el transporte del gas natural requieren de procesos que permitan su compresión y almacenamiento. La preparación incluye la eliminación del agua en la mezcla de hidrocarburos, del petróleo de la muestra del gas y la filtración del gas para separarlo de los sólidos presentes. También se eliminan del gas natural el ácido sulfhídrico y el dióxido de carbono, para que no corroan los gasoductos y el equipo de transporte y de compresión. (Duck, 1983)

## **1.2 HIDROCARBUROS NO CONVENCIONALES**

El desarrollo de los denominados yacimientos no convencionales (*shale gas*, *tight gas*, metano en capas de carbón, *shale oil*, etc.) son ahora el reto más grande en la industria petrolera. Estos tipos de yacimientos siempre estuvieron presentes al igual que los convencionales, pero debido a que la tecnología y los precios no hacían viable su explotación, nunca antes se había visto la posibilidad de extraerlos. (Vesga, 2013)

En respuesta a la disminución de las reservas de crudo en los Estados Unidos, se hizo necesario explorar fuentes energéticas alternativas. Debido a la amplia disponibilidad de yacimientos de gas contenido en los *shale plays*, la explotación actual de este recurso abastece una parte importante de la energía total consumida en este país. De acuerdo con la Agencia Internacional de Energía – IEA, este fenómeno es de carácter global. Según publicaciones realizadas por la agencia, se espera que para 2035, el 25% la energía consumida mundialmente

provenza de fuentes de abastecimiento de gas, por lo tanto es imprescindible analizar los impactos al medio ambiente que genera el desarrollo de esta actividad. (IEA, 2012).

**1.2.1 Shale Gas:** En las explotaciones no convencionales a menor porosidad y permeabilidad del tipo de roca, más complejas y agresivas son las técnicas requeridas para extraer el gas. En el caso de los reservorios de shale gas es más costoso debido a su baja porosidad y casi nula permeabilidad.

El *shale* o pizarra es una roca sedimentaria que fue depositándose como arcilla o lodo bajo el agua, formándose capas que fueron comprimidas por depósitos posteriores hasta convertirse en roca (Extracción de gas no convencional y la fractura hidráulica en Burgos, 2012). Esta generalmente presenta un color azul opaco en forma de planas laminares.

Este tipo de roca ya no actúa como sello, sino que actúa como roca generadora (Roca madre) y a su vez como yacimiento. El gas que es producido de este tipo de yacimiento es el mismo gas que se encuentra en los yacimientos convencionales, solo que éste ya no es tan fácil de extraer porque está atrapado en rocas con una permeabilidad tan baja (menor a 0,1 milidarcies y con una estructura de capas laminares donde la tecnología tradicional de perforación y extracción es complicada en este tipo de yacimiento. Este gas puede almacenarse intersticialmente en los espacios porosos, entre los granos de rocas o las fracturas del *shale*, o ser adsorbido en la superficie de los componentes orgánicos (Cavazzoli y Rachid, 2010).

La roca de esquisto o *shale* está compuesta de minerales sedimentarios tales como: moscovita, biotita, clorita, cuarzo, plagioclasa y minerales metamórficos como: cloritoide, estaurolita, andalucita, granate, sillimanita, etc. El esquisto es característicamente foliado, lo que quiere decir que los granos de minerales

individuales pueden separarse fácilmente en escamas o láminas. (EcuRed, 2013)  
La **Figura 4** muestra una roca de esquisto.

**Figura 4. Muestra de Esquisto**



Fuente: Colección Dr. Sánchez, José. 2002

El *shale gas* es producido únicamente bajo determinadas condiciones, aquellos *shales* que posean la combinación correcta en contenido orgánico, madurez de la roca, permeabilidad, porosidad, saturación de gas y fracturamiento de la formación, serán proyectos viables económicamente para la producción de gas. La experiencia en múltiples cuencas de gas de lutita de los Estados Unidos ha demostrado que los yacimientos de este tipo deben satisfacer o exceder ciertos parámetros para ser comercialmente viables, los cuales se muestran en la **Figura 5**.

El shale gas tiene espacios porosos que no son suficientemente amplios como para generar un movimiento masivo de las moléculas de gas contenido en su interior, además las fracturas naturales (fisuras) que puede poseer esta roca, aunque son beneficiosas, generalmente no proveen trayectorias de permeabilidad suficiente para soportar la producción comercial.

**Figura 5 Afloramiento de Roca Tipo Shale Gas, Parámetros mínimos para viabilidad comercial.**

<i>Parámetro</i>	<i>Valor mínimo</i>
Porosidad	> 4%
Saturación de agua	< 45%
Saturación de petróleo	< 5%
Permeabilidad	> 100 nanodarcies
Contenido orgánico total	> 2%

Fuente: Cavazzoli y Rachid, 2010

Se define a un *shale play* como un área geográfica prospectiva para el desarrollo de shale gas. Esta debe tener formaciones de rocas sedimentarias subterráneas ricas en compuestos orgánicos con las siguientes características: partículas muy finas, alto porcentaje de sílice y a veces carbonatos, baja permeabilidad, larga distribución en el área, buena porosidad y madurez térmica. (Caputo, James. 2011).

Los recursos naturales energéticos provenientes de los *shale play* son conocidos desde principios del siglo XX, pero hasta hace algunas décadas no existía la tecnología para extraerlos. A comienzos de los 70's, se estableció un convenio entre el Departamento de Energía de EE.UU. y el *Gas Research Institute* para potenciar el desarrollo de tecnologías que permitieran la producción comercial de gas natural proveniente de las rocas de esquisto. (YPF, 2013)

**1.2.1.1 Distribución Mundial:** En la actualidad no cabe duda de la abundante disponibilidad de recursos no convencionales de gas de lutita en el mundo, la experiencia adquirida por norte américa en la extracción de estos recursos, ha facilitado el desarrollo de este gas natural a nivel mundial (Robles y Cuta, 2015). Los principales países (**Figura 6**) con yacimientos de esquisto son Estados Unidos, Canadá, Brasil, Argentina, Francia, Alemania, Polonia, Australia y China. Estados Unidos de América tiene grandes recursos de estos yacimientos y, a su

vez, es un gran consumidor de petróleo. De hecho, este país es uno de los principales importadores de energía y se prevé que para el año 2017 sea el primer productor de petróleo, según datos de la Agencia Internacional de Energía. (EIA, 2013)

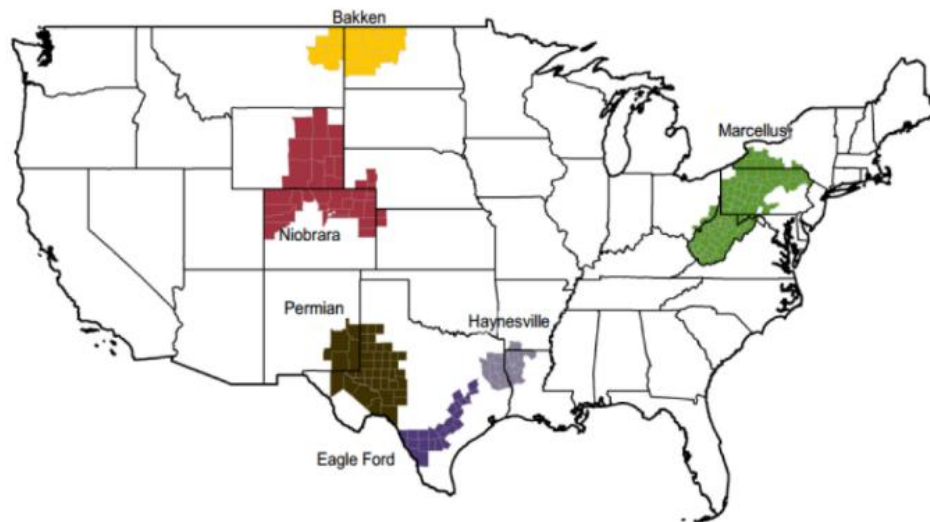
**Figura 6. Principales Yacimientos de Shale en el Mundo.**



Fuente: EIA, 2013

Canadá trabaja en la explotación de hidrocarburos a partir de yacimientos de arenas bituminosas. En Argentina está el yacimiento Vaca Muerta y en Colombia la formación geológica conocida como La Luna, en el Valle del Magdalena Medio, donde se concentra el potencial de hidrocarburos atrapados en esquistos.

**Figura 7. Ubicación Geográfica de los prospectos de Shale más importantes de los Estados Unidos.**



Fuente: Sieminski, 2014

Por su parte, Estados Unidos ha experimentado un gran aumento en sus recursos y producción de gas natural nacional gracias a seis *plays* que representan el 90% de este incremento. La declinación de la producción característica de estos yacimientos está siendo rápidamente compensada por el aumento de la producción de nuevos pozos (Robles y Cuta, 2015). La cuenca que representa mejor aporte a este clave es Marcellus, con un 75% del incremento de la producción del gas en el país (Sieminski, 2014).

Los recursos de shale y su producción se encuentran repartidos a lo largo de todo el territorio Americano, Las **Figura 7 y 8** permite mostrar la ubicación y los recursos restantes del shale gas en los Estados Unidos respectivamente para el año 2013.

**Figura 8. Recursos de los prospectos de Shale más importantes de los Estados Unidos.**

	Shale Gas Resources	
	Distinct Plays (#)	Remaining Reserves and Undeveloped Resources (Tcf)
<b>1. Northeast</b>		
- Marcellus	8	369
- Utica	3	111
- Other	3	29
<b>2. Southeast</b>		
- Haynesville	4	161
- Bossier	2	57
- Fayetteville	4	48
<b>3. Mid-Continent</b>		
- Woodford*	9	77
- Antrim	1	5
- New Albany	1	2
<b>4. Texas</b>		
- Eagle Ford	6	119
- Barnett**	5	72
- Permian***	9	34
<b>5. Rockies/Great Plains</b>		
- Niobrara****	8	57
- Lewis	1	1
- Bakken/Three Forks	6	19
<b>TOTAL</b>	<b>70</b>	<b>1161</b>

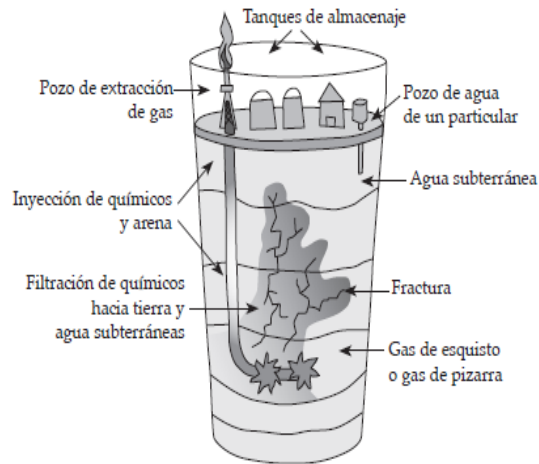
Fuente: EIA, 2013

## 2. FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO COMO TÉCNICA DE EXTRACCIÓN DE RECURSOS NO CONVENCIONALES

El gas natural, como fuente de energía empezó a ser reconocido desde el siglo XIV, pero el avance y el estudio de técnicas de extracción masiva, comercial y lucrativa de los *shale plays* empieza en 1990. Existen dos técnicas de extracción que son: la perforación horizontal dirigida y el fracturamiento hidráulico, mejor conocido como *fracking* (Calzoncit, 2013). El fracturamiento hidráulico de pozos es un método diseñado y empleado para la obtención y aprovechamiento del gas atrapado en las rocas del subsuelo en zonas muy profundas, en donde las propiedades del mismo no son óptimas para la recuperación del gas por medios convencionales.

La extracción de gas esquisto (*shale gas*) se lleva a cabo mediante la técnica de fracturamiento hidráulico (*fracking*), (**Figura 9**) la cual consiste en generar grietas en el subsuelo (pozos verticales) a profundidades de 3.000 y 4.000 metros y luego hasta seis pozos horizontales de uno o dos kilómetros de longitud (Bachetta, 2013), esto último para abarcar una mayor área. La vida útil de los pozos es de alrededor de 7 años con una baja en la producción a partir del quinto año. (Burgos, 2011)

**Figura 9 Diagrama de la extracción por técnica de *Fracking***



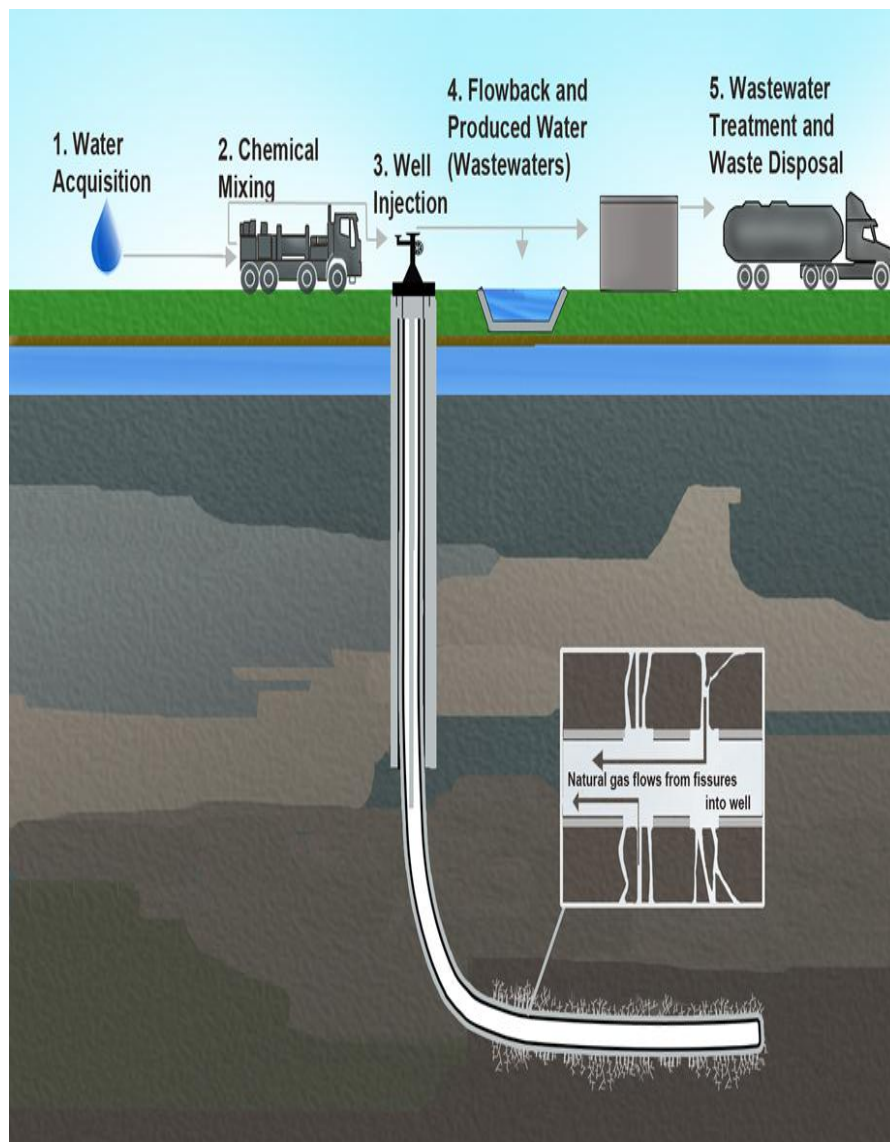
Fuente Bachetta, 2013

La extracción de gas natural de un pozo horizontal requiere el uso de más agua que los pozos verticales tradicionales, la cantidad de agua requerida por pozo oscila entre tres y cinco millones de galones de agua. Los productores de gas deben identificar y obtener los permisos de las agencias reguladoras estatales para retirar el agua de arroyos o ríos, las cuales limitan la extracción de agua para proteger la vida acuática y los recursos de la población. Las nuevas tecnologías, permiten a los productores reciclar y reutilizar casi toda el agua utilizada en el proceso de terminaciones. El agua que se utiliza para la fractura hidráulica es transportada hasta el sitio del pozo donde se mezcla cuidadosamente con arena y otros agentes lubricantes. Puede tomar varios días completar el proceso de estimulación, y requiere una vigilancia continua para garantizar la seguridad de los trabajadores y la protección del medio ambiente. (Vesga, 2013)

Los productores de gas natural reconocer que el proceso de perforación y terminación no está exenta de inconvenientes a corto plazo. Por ello algunos miembros de estas compañías se comprometen a trabajar con los municipios. Los pozos perforados se hacen donde el gas se encuentra atrapado, logrando fracturar la roca (pizarras y esquistos) para liberar el gas. Dichas fracturas se realizan

mediante explosivos o bien mediante la inyección a alta presión de medios líquidos hidráulicos, utilizando principalmente agua (**Figura 10**) con arena y una serie de aditivos químicos. (Corporación mexicana de investigación en materiales, 2013). Por lo general el fluido inyectado está compuesto en un 98% aproximadamente por agua y arena (como agente de apuntalamiento) y un 2% por productos químicos. (Burgos, 2011)

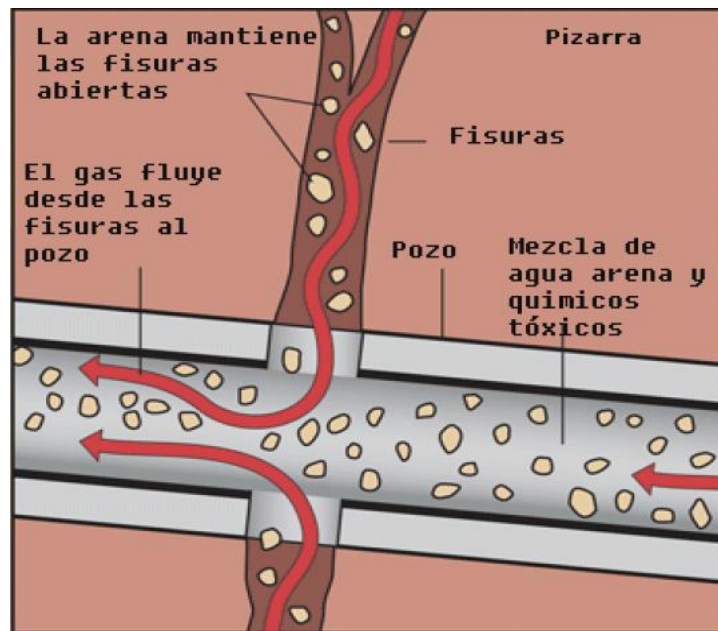
**Figura 10. Ciclo del agua empleada en el Fracking**



Fuente: EPA, 2012

El efecto del agente propante (tal y como se puede observar en la **Figura 11**) en la mezcla con agua durante la inyección de estos en los pozos, consiste en extender y mantener abiertas las grietas presentes en el material poroso (shale-plays) permitiendo que el gas logre ser extraído a la superficie a través de las fisuras realizadas en la roca de esquisto

**Figura 11. Efecto de la arena en las fracturas en shale – plays.**



Fuente: Burgos, 2012

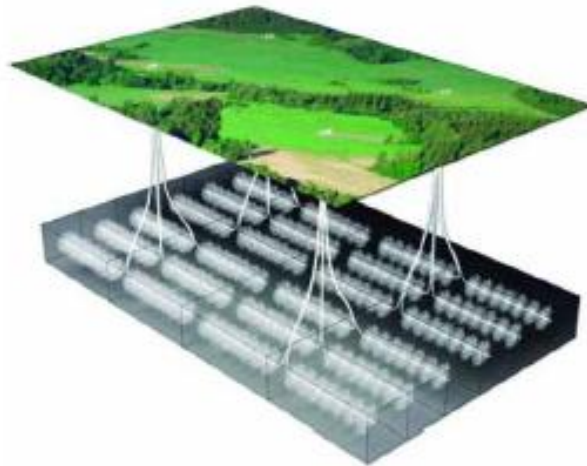
## 2.1 CONCEPTUALIZACIÓN

El fracturamiento hidráulico o fracking no es una tecnología nueva, los registros indican que fue desarrollado por primera vez en 1903, pero su primera aplicación comercial se produjo en 1948. Desde 1998, Estados Unidos ha visto un aumento en la perforación horizontal y el fracturamiento hidráulico como resultado del desarrollo del shale Barnett en Texas (*USA Congressional Research Service*, 2013). En el fracturamiento hidráulico se usa fluido a alta presión, compuesto

principalmente por agua, arena y ciertos componentes químicos, con el fin de abrir los poros de la roca y permitir que las fracturas permanezcan abiertas para que salga el gas al pozo (Sakmar, 2011). Sin embargo esta técnica se considera bastante compleja cuando es aplicada en rocas de baja permeabilidad, debido a que las zonas donde se depositaron los sedimentos para formar los esquistos es bastante extensa geográficamente y la forma en cómo se depositaron podría haber sido diferente para cada zona, por lo que el campo de esfuerzos al que se encuentra sometido podría variar (Arthur *et al.*, 2009).

La utilización de las técnicas de perforación de pozos horizontales y el fracturamiento hidráulico genera diferencias con las explotaciones convencionales respecto de la cantidad y distribución de pozos sobre los yacimientos. Debido a que este proceso permite que se perforen pozos múltiples desde una misma plataforma como se muestra en la **Figura 12**.

**Figura 12. Pad Multipozo para Desarrollo de Shale Plays**



Fuente: Cavazzoli y Rachid, 2010.

Antes de que las compañías operadoras y de servicios realicen un tratamiento de fractura hidráulica a un pozo, deben llevar a cabo una serie de pruebas para asegurarse de que el pozo, el equipo de cabeza del pozo y el equipo para fracturar

tienen un buen funcionamiento y que van a resistir las presiones y tasas a bombear. En Estados Unidos el mínimo de requerimiento para realizar esta práctica está establecido por cada estado (Arthur *et al.*, 2009).

Luego de probar que todos los equipos se encuentran en buenas condiciones, se realiza la perforación vertical atravesando capas de rocas y acuíferos, desde la plataforma en la superficie hacia donde se encuentra la capa de shale. Antes de llegar a la capa de shale comienza la perforación horizontal para poder penetrar en el estrato de interés. Como las distancias horizontales son muy largas, el proceso de fractura hidráulica que se iniciará después se lleva a cabo en varias etapas independientes. El proceso de perforación se lleva a cabo ininterrumpidamente las 24 horas del día durante meses. A medida que se van instalando los tubos de revestimiento (*casing*) que refuerzan el hueco de la perforación, se va cementando el espacio existente entre el exterior del tubo y la pared del pozo (espacio anular). La cementación es de suma importancia puesto que en la fase de fractura hidráulica el pozo es sometido a múltiples cambios de presión muy fuertes (Vesga, 2013).

Con la fractura hidráulica se generan unas pequeñas grietas en la cementación del pozo, las cuales se extienden por varios cientos de metros debido a la elevada presión con que entra el fluido inyectado. El tramo horizontal es dividido en varias etapas independientes empezando por el extremo final (pie). Cada etapa es fracturada alrededor de 15 veces consecutivas y cada una con aditivos específicos. Por lo tanto cada pozo es sometido a un gran número de fuertes compresiones y descompresiones que ponen a prueba la resistencia de los materiales y la correcta realización de la cementación, de las uniones, del sellado, etc.

Aproximadamente un 98% del fluido inyectado es agua y un agente de apuntalamiento (normalmente arena) que sirve para mantener abierta las fracturas

formadas, permitiendo así la extracción posterior del gas a través del tubo de producción. El 2% restante son productos químicos que sirven para lograr una distribución homogénea del agente de apuntalamiento, facilitar el retroceso del fluido, inhibir la corrosión, limpiar los orificios y tubos y como antioxidante, bioxida/bactericida.

La perforación y el fracturamiento hidráulico de pozos horizontales de shale gas requiere de aproximadamente entre 2 a 20 millones de galones de agua por pozo, dependiendo de las características de la formación y de cada pozo en particular. Se plantea que un pozo podría alcanzar una profundidad horizontal de uno a tres kilómetros, y este a su vez podría ser dividido en de veinte a cien etapas, por lo tanto este requerimiento es aceptable. Además de este rango de agua, se debe calcular un 25% adicional el cual es usado típicamente para la perforación, extracción y el tratamiento de los agentes propantes (Jackson et al., 2015). Aunque a pesar que la cantidad de agua consumida es sustancial, este volumen es relativamente pequeño cuando se comprara con otras industrias, como la agrícola y la termoeléctrica. En Texas por ejemplo, la cantidad del agua utilizada para fracturamiento hidráulico representa solamente el 1% del agua total empleada en el estado (Nicot and Scanlom, 2012).

La **Figura 13** contiene una tabla comparativa que permite tener una referencia de cuánta agua se gasta extrayendo gas no convencional con respecto a otras fuentes de energía. Sorprendentemente, dada toda la atención que el fracturamiento hidráulico recibe por su requerimiento de agua, la extracción y el procesamiento del gas de esquisto es menos intensa que otras fuentes de energía, tales como el carbón, la energía nuclear y la extracción de crudo convencional. (Jackson et al., 2015).

**Figura 13. Comparación de consumo de agua por generación o extracción de diferentes recursos energéticos**

Fuente de Energía	Agua necesaria para su extracción (L/GJ, galones/MMBTU)	Agua necesaria para su extracción y procesamiento (L/GJ, galones/MMBTU)	Intensidad de Consumo de Agua (L/MWh)
Gas Natural Convencional	0.7, 0.2	1.9, 6.7	-
Gas Natural No Convencional	8.6, 2.4	15, 4.1	-
Carbón Pulverizado	9.0, 2.5	27, 7.5	1,400
Crudo Saudí	9.0, 2.5	110, 32	NA
Shale Oil	200, 57	240, 67	NA
Arenas Bituminosas	NA	110, 31	NA
Energía Nuclear	14, 4	47, 13	1,700
Etanol de Maíz	300, 83	430, 119	2,100
Etanol de Maíz (irrigado)	14,000, 3,800	14,000, 3,800	16,000
Celdas Fotovoltáicas	0,0	0,0	10
Energía Solar Concentrada	NA	NA	3,100
Energía Eólica	0,0	0,0	4

Fuente: Jackson et al., 2015 (Adaptado)

El agua con frecuencia proviene de los cuerpos de agua superficiales como ríos y lagos, pero también pueden provenir de las aguas subterráneas y aguas producidas reutilizadas (Coughlin y Arthur, 2011).

## 2.2 ADITIVOS QUÍMICOS EMPLEADOS

Los aditivos empleados en la mezcla con agua incluyen ácidos, bactericidas, estabilizadores de arcilla, inhibidores de corrosión, reticulantes, reductor de fricción, gelificante, controlador de metales, inhibidor de sarro y surfactantes. (Bachetta, 2013) En la **Tabla 1** se registran los principales componentes químicos empleados en el proceso de *Fracking*

**Tabla 1 Agentes químicos empleados en el *Fracking*.**

<b>COMPUESTO</b>	<b>FUNCIÓN</b>	<b>USO Y APLICACIONES MÁS COMUNES</b>
<b>ACIDOS</b>	Ayuda a disolver los minerales e inicia el rompimiento de la roca (pre-factura)	Limpiadores de piscina
<b>CLORURO DE SODIO</b>	Permite retrasar la descomposición de la cadena de polímeros	Sal de mesa
<b>POLIACRILAMIDA</b>	Minimizar la fricción entre el fluido y el pozo	Tratamiento de agua. Condicionamiento de suelos.
<b>ETILENGLICOL</b>	Previene el aumento de depósitos en el pozo	Anticongelante de automóviles Limpiadores de piso
<b>SALES DE BERABE</b>	Mantiene la viscosidad de los fluidos, aumentando la temperatura	Detergentes Jabones de mano Cosméticos
<b>CARBONATO DE SODIO / CARBONATO DE POTASIO</b>	Mantener el equilibrio iónicos entre los otros componentes durante el proceso	Detergentes, jabones Cerámicas Vidrios
<b>GLUTERALDEHIDO</b>	Elimina bacterias presentes en el agua	Desinfectantes Esterilización de equipos médicos y odontológicos.
<b>ACIDO CITRICO</b>	Previene la precipitación de óxidos metálicos	Aditivos alimenticios Comidas y vegetales Jugo de limón
<b>ISOPROPANOL</b>	Aumentar la viscosidad e los fluidos empleados para la fractura	Limpiador de vidrios Tintes de cabellos

Fuente: Adaptado de S.A TOTAL, 2012

Las funciones de las sustancias químicas empleados en el proceso de *fracking* o fracturamiento hidráulico para extraer gas de rocas de esquisto son: Generar una distribución homogénea del agente de apuntalamiento (arena); facilitar el retroceso del fluido; inhibir reacciones de corrosión ayudando en la limpieza de los orificios y tubos; y actuando como agente antioxidante, biocida y bactericida. (Corporación Mexicana de Investigación en Materiales, 2013)

### 3. ANÁLISIS DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES GENERADOS POR EL USO DEL FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO EN LOS ESTADOS UNIDOS

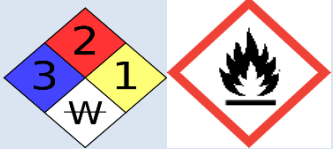

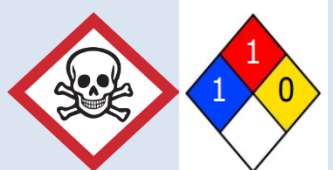

A pesar de que cada aspecto de la fractura hidráulica es controlado, supervisando que todas las partes del pozo estén en buen estado, realizando pruebas de presión al equipo bombeando agua o lodos antes de la estimulación con el fluido de fractura, todo este monitoreo cuidadoso no evita que existan numerosos riesgos que han dado lugar a diferentes incidentes graves de contaminación y generado preocupaciones sobre las consecuencias ambientales asociadas a esta operación.

Algunas compañías productoras de *shale gas* han empezado, por iniciativa propia, a tener más conciencia y compromiso en proteger al medio ambiente, al reutilizar los fluidos producidos durante un fracturamiento hidráulico y, a contribuir dando a conocer la información sobre los químicos utilizados a las diferentes organizaciones interesadas (Vesga, 2013). Dentro de los principales compuestos utilizados en operaciones de *fracking*, destacan mezclas de agentes químicos tan diversos como el isopropanol, etilenglicol, poliacrilamida y gluteraldehído. La **Tabla 2** muestra los riesgos químicos asociados a estos agentes.

Sin embargo, estas acciones no han evitado que los diversos grupos ambientalistas y legisladores dejen de resistirse a que continúe la explotación del *shale gas*, debido a que el impacto ambiental que se ha ocasionado en Estados Unidos, por estas operaciones, es inmenso e irreparable, y las actividades y normatividades ambientales no han sido reglamentadas aún. A su vez, la oposición que se ha gestado en Estados Unidos se ha replicado en otros lugares del mundo, logrando así, por ejemplo, que en el 2011 Francia aprobara una ley

que prohíbe la técnica de fracturamiento hidráulico (Observatorio Petrolero Sur (2012) Yacimientos no Convencionales en Argentina).

**Tabla 2. Riesgos de Compuestos Químicos asociados al Fracking**

Compuesto	Pictograma de seguridad	Característica química de peligrosidad
Isopropanol		Líquido y vapores inflamables. (Nivel de inflamabilidad 3) Tumorigeno, mutagénico y causante de efectos reproductivos.
Etilenglicol		Nocivo, irritante, tóxico. Afecta el sistema nervioso
Poliacrilamida		Genera gases tóxicos La partículas finamente dispersas forman mezclas explosivas con el aire Contaminación acuático, afectación en peces
Glutaraldehido		Destruye tejidos. Representa problemas graves y agudos a la salud Evitar respirar el vapor

En Estados Unidos se han presentado numerosas denuncias debido a la contaminación del medio ambiente durante todo el ciclo de la explotación y extracción del shale gas. Es por ello que, para llevar a cabo un desarrollo

adecuado de este recurso, se requiere un estudio cuidadoso sobre posibles impactos ambientales generados por la práctica de esta técnica y las posibles regulaciones que se pueden plantear para evitar riesgos potenciales al medio ambiente y la salud pública. La principal entidad encargada de este estudio es la agencia de protección ambiental EPA (por sus siglas en inglés), y es la que se encargará de entregar al Congreso de ese país, la ponencia de ley con la exposición de motivos detallado, para que este último sea el que tome la decisión de imponer o no nuevas regulaciones a la explotación del shale gas.

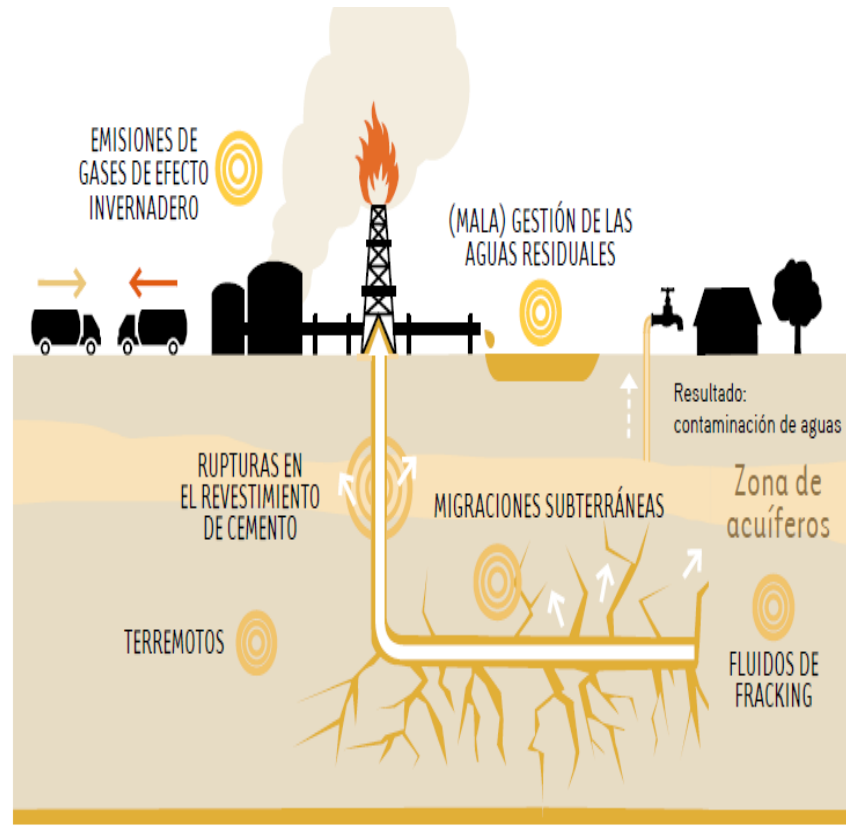
Los pozos horizontales en comparación con los pozos verticales tienen ciertas ventajas tanto técnicas como ambientales, estos se pueden extender hasta un poco más 6000 pies de largo y drenar un área de aproximadamente 4000 veces mayor que la drenada por un pozo vertical. El aumento de drenaje crea una serie de importantes ventajas en relación con las preocupaciones ambientales, disminuyendo las áreas perdidas de vegetación, el hábitat perturbado y la construcción en general. Reducir el número de pozos de producción en un campo también reduce la necesidad de personal de campo, el tráfico de camiones, el ruido del tráfico además de menos personal de mantenimiento de las carreteras. (Vesga, 2013)

Estos impactos pueden reducirse aún más por medio de estrategias de mitigación dentro del campo, tales como muros de sonido y otros. Debido a que el shale contiene algunas zonas de agua y es propenso a daños durante la perforación con lodo, algunos pozos del shale de Marcellus son perforados con aire. El aire al igual que el lodo de perforación, tiene las funciones de lubricar, enfriar la broca y quitar cortes secos que pueden ser más fácilmente manejados que los residuos húmedos, pero esta está limitada a formaciones de menor presión, tales como las del *Shale* de Marcellus (Arthur et al., 2009).

En zonas rurales donde se lleva a cabo la extracción de gas natural en EE.UU mediante la técnica de *fracking* se registran incrementos en la contaminación de aire, agua y suelo por exposición a los aditivos químicos empleados en el proceso, la muerte de más de 70 animales, mutagenicidad, trastornos reproductivos y gastrointestinales (Howarth *et al*, 2011).

La **Figura 14** hace un recuento de los principales focos de contaminación que acarrea la explotación del gas de esquisto. Dentro de las principales se encuentran las migraciones subterráneas de agua (contaminantes del suelo y de los recursos hídricos), la emisión de gases de efecto invernadero y el aumento de la actividad sísmica. A continuación se hace una recopilación de las principales preocupaciones ambientales asociadas al desarrollo de proyectos de Shale.

**Figura 14. Presuntos Impactos ambientales de la producción de Shale Gas**



Fuente: AMIGOS DE LA TIERRA. Fracking un pozo sin fondo. Dossier informativo, 2014.

### 3.1 CONTAMINACIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS

Para minimizar la potencial contaminación de cuerpos de agua, por los cientos de químicos encontrados en los fluidos de fracturamiento, es vital mantener la integridad de los pozos y tener sistemas de disposición apropiados para las aguas residuales del campo. (Jackson et al., 2015)

En teoría, el fracturamiento hidráulico podría abrir fracturas incipientes en el subsuelo, miles de metros bajo tierra, conectando acuíferos someros con capas más profundas, lo cual proveería un conducto para que los químicos del agua del fracturamiento y las salmueras de la formación (las cuales son ricas en metales pesados y altamente contaminantes) migren arriba (Kibble et al., 2013). En la práctica, que esto ocurra es poco probable debido a las profundidades de la mayoría de los yacimientos de *shale gas* (los cuales se encuentran en un rango de 1000 a 3000 metros) y debido a que los datos de microsísmica muestran que las hidro-fracturas inducidas por el hombre rara vez se propagan más de 600 metros (Davies et al, 2012). Un escenario más factible sería si las fracturas se conectaran a una falla natural, a un pozo abandonado o hacia algún camino subterráneo, permitiendo que los fluidos migren hacia arriba (Myers, 2012).

Sin embargo, existe una forma más sencilla para la contaminación de fuentes de agua subterránea, la cual es la integridad del pozo. Osborn et al. (2011) analizaron la contaminación del agua potable de 68 casas localizadas sobre el Marcellus Shale en Pennsylvania, Estados Unidos. No se encontraron evidencia de un incremento de sales, metales o radioactividad en el agua potable de las casas en el rango de un kilómetro de los pozos de gas. Sin embargo, si se encontraron concentraciones de metano 17 veces mayores a las normales, además de altas concentraciones de etano y del isótopo  $^{13}\text{CH}_4$ , las cuales aparentemente son de fuentes termogénicas (como la de los combustibles fósiles).

En otro estudio (Jackson et al., 2013) analizó pozos de agua potable para 141 casas rurales en la misma región Marcellus en Pennsylvania, y utilizó datos extensivos de relaciones de gas y de identificación isotópica para poder dar con las causas de la alta concentración de gas natural observada. Los resultados sugieren que en algunas casas, residuos del gas de la formación Marcellus eran los contaminantes, mientras que en otras casas se debía a capas convencionales de gas provenientes del devoniano superior. Los investigadores concluyeron que los problemas en la cementación del pozo fueron los posibles causantes del gas metano fugado en los acuíferos someros de la zona.

El efecto que tienen los aditivos químicos del fracturamiento en el agua es más controvertido. En Pavillion, Wyoming probablemente se encuentre uno de los casos más controversiales en este tema. En este lugar, los investigadores de la EPA encontraron niveles de benceno (conocido cancerígeno) en niveles 50 veces mayor a los permisibles, además de contaminantes altamente peligrosos como el tolueno y el 2-Butoxyetanol, un solvente comúnmente utilizado en fluidos de fracturamiento. A diferencia de las otras áreas de desarrollo de shale gas, esta formación se encontraba a profundidades atípicamente someras (322 metros), mientras que los pozos de agua potable se encontraban a 244 metros. Esta falta de separación entre las capas horizontales hizo que la conductividad entre estratos se viera afectada, favoreciendo la posible comunicación (DiGuglio, 2011)

Se continúa investigando en otros aspectos de la calidad del agua potable y su relación con el fracturamiento hidráulico, incluyendo el potencial para altas concentraciones de metales y otros elementos cercanos a pozos de *shale gas*. Fontenot et al., (2013) tomó muestras de 100 pozos de agua potable sobre el Barnett shale y documentó niveles significativamente altos de arsenico, selenio, estroncio en los pozos de agua en un radio menor a 3 km de los pozos de gas.

A pesar de las publicaciones hechas por la EPA, las comunidades locales, ambientalistas y otras entidades, no dejan de expresar y denunciar las posibles contaminaciones de las operaciones de *Shale gas*, alegando principalmente la contaminación del agua potable (Vesga, 2013).

Extraer agua superficial durante flujos bajos (cambios de estación) podría afectar los suministros de aguas municipales e industriales, así como la vida acuática (Arthur, Trotsky y Wilson 2010). El agua que se extrae del pozo en la producción con el *shale gas* contiene altas concentraciones de sólidos totales disueltos, además de diversos productos químicos orgánicos e inorgánicos, metales y materiales radiactivos naturales (*Naturally Occurring Radioactive Material*) o NORM por sus siglas en inglés. Esto no permite que los residuos puedan ser depositados en ningún curso de agua natural después de ser producidos, por esta razón el agua debe ser reutilizada o reinyectada, y aun así cierta cantidad significativa de agua requiere su eliminación.

Algunos operadores reinyectan estas aguas en un pozo específico (usado solo para ese fin), otros los transportan a plantas de tratamientos públicos o privadas que pueden no estar equipadas para tratar este tipo de aguas, dando como resultado descarga de contaminantes a los ríos, lagos o cualquier otro donde pueden afectar el agua potable o la vida acuática.

La inyección subterránea ha sido tradicionalmente la primera opción de eliminación más utilizada por las operaciones de petróleo y gas. Sin embargo, la inyección subterránea de agua producida no es factible en algunos plays de shale de gas, como el de Marcellus, donde las limitaciones geológicas evitan la inyección subterránea profunda (ALL y GWPC 2009). Como resultado, el agua producida es a veces transportada en camiones por cientos de kilómetros a las instalaciones de eliminación de residuos. Esto genera mayores impactos en las carreteras y las comunidades como consecuencia del aumento del tráfico de

camiones, así como un aumento de los costos para los operadores. En otras áreas, como el Shale de Barnett alrededor de la Ciudad de Fort Worth (Dallas), se han construido tuberías para transportar el agua a algunos pozos inyectoros de eliminación, y así minimizar el impacto asociado con el transporte de camiones de agua.

### **3.2 CONTAMINACIÓN DEL AIRE**

Extraer combustibles fósiles de yacimientos de baja permeabilidad es un proceso industrial que emite contaminantes al aire en cada etapa de operación. En comparación a la extracción de hidrocarburos convencionales, el gas natural proveniente de yacimientos no convencionales requiere una mayor densidad de pozos (aproximadamente 1 por cada 10 hectáreas) y una perforación más sostenida para mantener los niveles de producción debido al alto declinamiento en la producción del pozo (Jackson et al., 2015).

Las emisiones de contaminantes por energías no convencionales empiezan desde el momento que se construye el sitio para la perforación, las redes de tubería, estaciones de compresión y facilidades de superficie. La preparación en infraestructura, incluyendo el acceso a carreteras y crear un pad de pozos de 3 a 5 acres y perforar como tal, genera emisiones de dióxido de carbono, material particulado y nitratos, a partir de los motores diésel de los equipos (Moore et al., 2014).

Las emisiones en las operaciones de shale gas son muy similares a las operaciones convencionales de gas natural. Una vez que un pozo está produciendo, se pueden presentar emisiones fugaces en compresores, bombas o conexiones en tuberías de transporte, asimismo también se presenta emisiones al aire desde el fluido de fracturamiento almacenado en las piscinas. Estas fugas

pueden ser minimizadas a través de inspecciones periódicas de las válvulas, conectores y líneas abiertas con las tecnologías de detección, y además de las mejores prácticas de manejo oBMPs por sus siglas en inglés (Best Management Practices) que son diversas prácticas para proteger los suministros de agua, preservar la calidad del agua y asegurar que los residuos de perforación y producción sean desechados correctamente con la finalidad de cumplir con la reglamentación del aire limpio (Act Clean Air) dictadas por la jurisdicción federal, estatal y local (Arthur, 2010)

Un estudio de contaminación del aire realizado en Fort Worth, Texas, publicado en febrero de 2011, detectó numerosos compuestos orgánicos volátiles y otras sustancias tóxicas en el aire alrededor de muchos pozos de *shale gas* de la región. La comunidad de Fort Worth comenzó a preocuparse por las peticiones de la industria para que les permitieran perforar a menos de 1200 pies de distancia de las escuelas locales. Debido a esto, la comunidad pidió a expertos independientes estudiar cómo la contaminación viajaría por el aire y así determinar los riesgos de los pozos a las escuelas. En la universidad de Texas en Arlington, un profesor de ingeniería ambiental y otros expertos corrieron modelos de computadora para estudiar esto. Los modelos mostraron que dentro de una milla en dos sitios donde se realizó la prueba, el disulfuro de carbono (un neurotóxico) estaba presente en cantidades mayores en un muy corto tiempo para lo que es considerado aceptable para la salud.

Con base a este estudio la comunidad concluyó que “los niveles medidos de disulfuro de carbono eran significativamente superiores para los límites regulados y recomendados a los que un trabajador puede exponerse a corto tiempo. El reporte explica lo que puede causar a una persona si se expone más tiempo del indicado en esa concentración, "cambios en la respiración, dolor de pecho, dolor muscular, debilidad, pérdida de sensación en las manos o pies, problemas en los ojos, ampollas en la piel, fatiga crónica, pérdida de memoria, cambios de

personalidad, irritabilidad, mareos, anorexia, pérdida de peso, psicosis, polineuropatía. El daño de los riñones y el hígado, dermatitis, deterioro mental, enfermedad de parkinson y demencia ", por lo que sugerían que los sitios de perforación estuvieran a por lo menos una milla de todas las escuelas

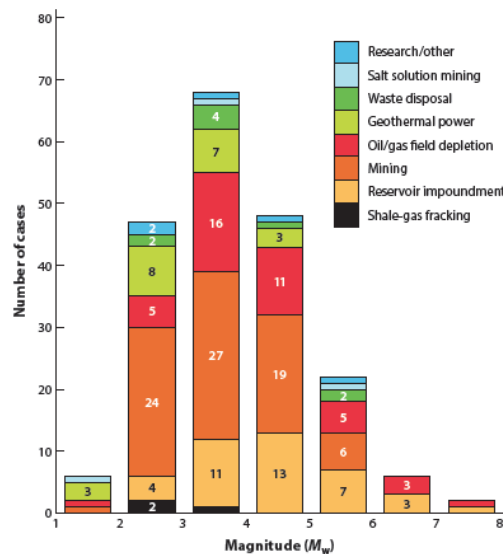
### **3.3 AUMENTO DE LA ACTIVIDAD SÍSMICA**

La sismicidad inducida asociada a fracturamientos hidráulicos de altos volúmenes ha recibido una atención considerable en los Estados Unidos. Es necesario examinar la evidencia por sismicidad inducida en dos etapas de la extracción del recurso: fracturamiento hidráulico, el cual raramente induce terremotos lo suficientemente grandes para ser sentidos por las personas en la superficie, e inyección de aguas residuales, la cual causa terremotos con una energía mucho mayor. El Consejo Nacional de Investigación de los Estados Unidos (NRC, 2013) provee una revisión de sismicidad inducida debido a extracción energética en general.

La reactivación de fallas a partir del fracturamiento hidráulico, disposición de aguas residuales u otros procesos subterráneos, ocurre a partir de un incremento en la presión de poro de las rocas, consecuentemente, existe una reducción del esfuerzo efectivo en una zona de falla (Davies et al., 2013). El nuevo incremento en presión permite que la energía elástica almacenada en la roca sea liberada más fácilmente, tal y como remover el peso de una caja hace que sea más fácil deslizarla en el piso (Zoback, 2012). Inyectar líquidos para fractura, o disponer de aguas residuales en el fondo, podría intersectar una zona de falla de manera directa, o transmitir un pulso de presión el cual reduzca el esfuerzo efectivo en la falla. (Jackson et al., 2015).

La sismicidad atribuida al fracturamiento hidráulico ha sido documentada solo en un puñado de casos, y en ninguno de estos eventos sísmicos se ha registrado una magnitud mayor a 4.0 Mw. (Ellsworth, 2013). En el 2011, el fracturamiento hidráulico indujo temblores de entre los 2.3 y los 2.8 Mw en el campo Eola en Oklahoma, USA (de Pater and Baish, 2011). En algunos casos, las fallas son un objetivo del fracturamiento hidráulico debido a que los planos de falla son asociados frecuentemente con caminos de flujo altamente permeables (Brodylo et al., 2011). Sin embargo, el número de reportes de sismicidad inducida debido al fracturamiento hidráulico es bajo en comparación con otros agentes humanos, tales como la minería o la construcción de represas, tal y como lo muestra la **Figura 15**, la cual relaciona casos desde 1929 (Jackson et al., 2015).

**Figura 15. Casos de Sismicidad Inducida para diferentes eventos contra Magnitud.**



Fuente: Jackson et al., 2015.

La sismicidad inducida por inyección de aguas residuales es menos común, pero genera eventos de energía mayor. Existen muchos más terremotos sentidos en operaciones de disposición de agua que debido al fracturamiento hidráulico. Entre

1967 y el 2000, los geólogos observaron una tasa de 21 terremotos por año, con una magnitud de 3.0 Mw o mayor en el centro de los Estados Unidos (Ellsworth, 2013). Empezando en el 2001, cuando el gas de esquisto y las otras tecnologías no convencionales empezaron a crecer, esta misma tasa de terremotos llegó a aproximadamente 100 terremotos (188 solamente en el 2011). Los científicos de la USGS atribuyeron este incremento en la tasa de terremotos a la inyección de aguas profundas a partir de operaciones de extracción de hidrocarburos en la región.

La magnitud de los terremotos que acompañaron la inyección de aguas residuales es mayor, ya que estos terremotos pueden llegar a los 5.7 Mw (Brodylo et al., 2011). Solamente en el 2011, se registraron terremotos inducidos de 4.0 a 5.3 Mw en locaciones tales como Youngstown, Ohio; Guy, Arkansas; Synder y Fashing, Texas y Trinidad, Colorado. Posiblemente, el mayor terremoto causado por una inyección de aguas residuales fue de 5.7 Mw cerca de Prague, Oklahoma, en el 2011. Este terremoto destruyó 14 casas e hirió a dos personas.

Para prevenir este tipo de terremotos, Zoback (2012) propone cinco pasos fundamentales:

- Evitar la inyección de agua en fallas activas o en rocas friables.
- Limitar las tasas de inyección y los tipos de formación, para minimizar los incrementos en la presión de poro.
- Instalar registros sísmicos en la zona, los cuales permitan medir el potencial.
- Establecer protocolos por anticipado, para modificar operaciones en caso de que se induzca actividad sísmica
- Reducir las tasas de inyección o abandonar los pozos en caso de actividad sísmica.

### 3.4 OTROS IMPACTOS

El ruido durante la perforación puede crear un reto operativo para los operadores de Shale gas, especialmente en áreas urbanas. La preparación de la ubicación del pozo y la construcción de carreteras de acceso utiliza excavadoras, retroexcavadoras y otros equipos de construcción que generan bastante ruido en especial en zonas muy cercanas a la población como es el caso de la ciudad de Fort Worth. El ruido que es ocasionado en la perforación horizontal es mayor que el de la perforación convencional de gas. Así mismo, el fracturamiento hidráulico ocasiona ruido debido a los volúmenes y presiones que se necesitan para poder estimular la formación con éxito. El ruido generado por la torre de perforación puede ser reducido por sistemas de mitigación como muros temporales de sonido **(Figura 16)**.

Además, estas operaciones alteran la superficie de la tierra impactando tanto la vida salvaje como su hábitat durante las etapas de exploración, desarrollo, operación y abandono. Sin embargo las tecnologías de perforación de pozos horizontales y las plataformas multipozos reducen esta perturbación de la superficie.

**Figura 16. Muro Temporal para Mitigar las Operaciones de Shale**



Fuente: Vesga, 2013.

En diciembre de 2007 una casa en Bainbridge, Ohio, explotó desde su interior ocasionando graves daños a la propiedad sin dejar lesionados. Ante este hecho el Departamento de Recursos Naturales de Ohio (ODNR por sus siglas en inglés) junto con otras autoridades de seguridad locales realizaron una amplia investigación y determinaron que el gas causante de la explosión provenía de los pozos de agua. Debido a esta situación 19 casas fueron evacuadas preventivamente por la misma causa. La ODNR concluyó que se generó una sobre presión en un pozo de producción de gas entre noviembre 13 y diciembre 15 de 2007, el cual migró desde el revestimiento del pozo hasta el acuífero a través de fracturas naturales presentes en la roca, y de allí a los hogares. Tres diferentes factores en el pozo productor fueron identificados por la ODNR como las causas raíces del problema. Primero, dedujeron que la compañía había realizado una mala cementación de la tubería de producción, segundo, concluyeron que además de esta defectuosa práctica tomaron la mala decisión de proceder con el fracturamiento hidráulico del pozo sin haber hecho un adecuado trabajo de cementación, y tercero y más importante causa raíz para los investigadores fue

que el día 31 después de haber terminado el tratamiento de fracturamiento hidráulico se generó una sobrepresión a través del espacio anular de la tubería que provocó fallas en el revestimiento y posterior migración del gas. Después de este suceso la ODNR tomo acción y requirió que la compañía Ohio Valley Energy Systems Corporation se hiciera cargo del problema y lo remediara. Esta compañía al final logró enmendar este error según el reporte final de la ODNR.

**Figura 17. Vaca Muerta en Caddo Parish, Louisiana**



Fuente: PTAC, 2012.

En Abril de 2009 en la ciudad de Caddo Parish, Louisiana, más de una docena de vacas fueron encontradas muertas cerca a unos pozos de gas (**Figura 17**). Este incidente involucró la posible relación entre sustancias químicas utilizadas durante un trabajo de fracturamiento hidráulico, las cuales pudieron filtrarse al suelo por fugas de algunas de los tanques o tuberías dentro del sitio. Este derrame no se informó ya que no cumplía con la cantidad reportable bajo las regulaciones del estado de Louisiana. El Departamento de Calidad Ambiental de Louisiana, LADEQ por sus siglas en inglés, realizó una investigación que encontró que debido a las lluvias, los productos del fracturamiento hidráulico habían sido arrastrados hacia el

suelo, y desde allí llegado a la zona donde se encontraban las vacas. De inmediato se tomaron medidas de contención para el derrame, y la LADEQ llegó a un acuerdo con Chesapeake Energy y su empresa contratista Schlumberger para que pagaran \$22,000 por cada una de las vacas muertas. LADEQ confirmó también que habían encontrado cloruro de potasio sobre el pasto en otra zona accesible a vacas, la cual se encontraba muy cerca al sitio donde había ocurrido el derrame citado anteriormente. Bajo estos nuevos hechos, las compañías Chesapeake Energy y Schlumberger reevaluaron sus actividades en los sitios de almacenamiento, y el manejo para mejorarlos, previniendo así futuros derrames de químicos. Como resultado Schlumberger implemento mayores medidas de seguridad a lo largo de todo el país, al expandir sus contenedores de derrames alrededor de los almacenamientos de productos químicos, aumento la vigilancia de todos los sitios donde se maneja estos productos químicos y exigió a todo su personal informar de cualquier derrame que se presentara sin importar la cantidad. Por su parte Chesapeake también solicitó medidas similares a las que Schlumberger implemento a sus otros contratistas en otros sitios de operación de la compañía en los Estados Unidos (PTAC, 2012).

#### 4. COLOMBIA Y SU INCURSIÓN EN LA EXPLOTACIÓN DEL SHALE GAS

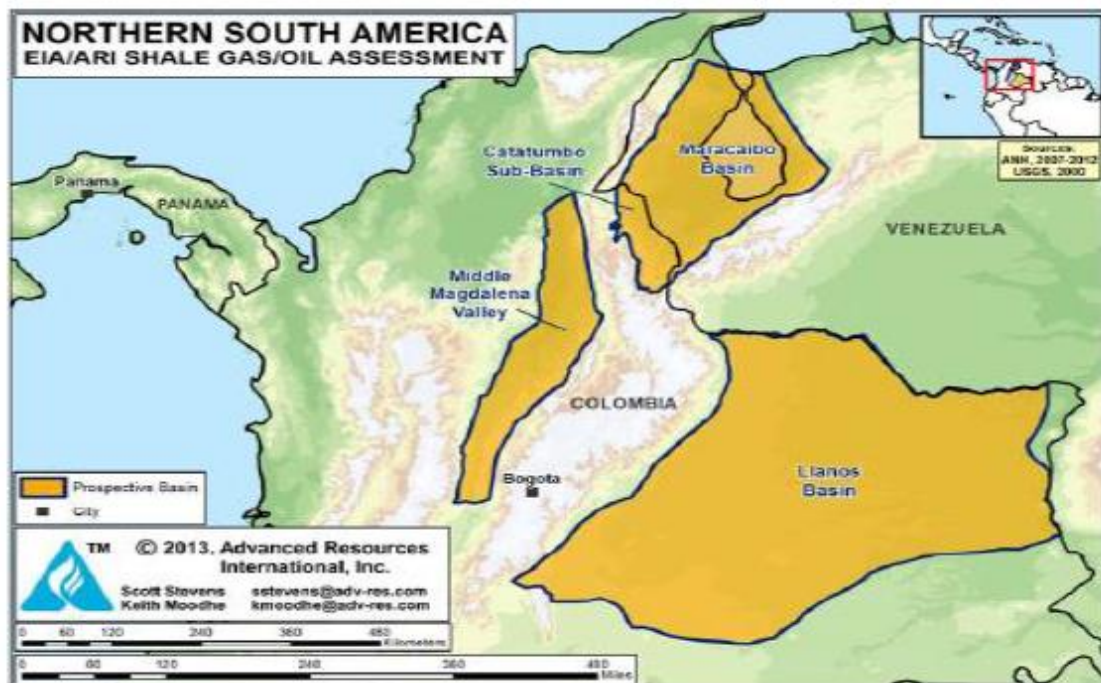
Colombia tiene sólo seis a siete años de reserva de barriles de crudo por lo que debe ponerse en la tarea de buscar y encontrar hidrocarburos en yacimientos no convencionales. (Lloreda, 2014). Ante el agotamiento de los estratos convencionales, es decir los más baratos, de fácil acceso y de alta calidad, le llegó el turno a los hidrocarburos no convencionales. (Fernández, John). Las dos grandes áreas donde se encuentran las rocas de esquisto, son en el Magdalena Medio y el Catatumbo (AFP, 2014) Colombia es uno de los cinco países de América con mayor potencialidad en este tipo de recursos hidrocarburos, con 2.500 millones de barriles. (Chacón, 2014).

Colombia, cuarto productor de petróleo de Latinoamérica, enfrenta el dilema del crudo de esquisto, una solución ante la escasez de reservas convencionales, pero cuya extracción entraña un alto riesgo de desatar temblores en un país de intensa actividad sísmica. Las actividades de fracturación de esquisto o de rocas de lutitas para extraer gas natural empleando la técnica de *Fracking* puede ser un gran problema para un país como Colombia, situado en el Cinturón de Fuego del Pacífico, donde se produce el 90% de los terremotos y se ubica el 75% de los volcanes del mundo. (AFP, 2014)

Nuestro país es considerado como el séptimo país con mayores reservas de gas natural (Alarcón y Bocanegra, 2013), en Suramérica se cuantifican 222 TCF (Terapias cúbicos) de gas técnicamente recuperable, en donde el 25% del valor total corresponden a las reservas del país, con un valor estimado en 55 TCF. Distribuidos en tres cuencas: Valle medio del Magdalena, Llanos Orientales y Catatumbo; todas de origen sedimentario marino Cretácico. La **Figura 18** muestra las cuencas prospectivas dentro del territorio Colombiano.

Las grandes compañías han iniciado estudios en diversos bloques otorgados por la ANH, para la exploración de yacimientos no convencionales (Shale Gas), por ello Colombia prevé que este tipo de recursos tomarán cada vez más importancia en la perspectiva energética y económica del país (Robles y Cuta, 2015).

**Figura 18. Cuencas prospectivas para Shale Gas dentro del territorio Colombiano.**



Fuente: EIA, 2013

En la **Tabla 3** se presenta la distribución de las formaciones en las cuencas anteriormente mencionadas, teniendo en cuenta si cumplen con las características físicas para ser consideradas como no convencionales. Esta caracterización hecha por la ANH evaluó el potencial de 23 cuencas sedimentarias del subsuelo colombiano. En amarillo se pueden observar formaciones productoras de recursos convencionales, mientras que en rosado se muestran las formaciones generadoras, es decir, las formaciones prospectivas a albergar shale plays. En Colombia destacan la formación la Luna (como la mayor formación de roca

generadora que pasa por el país), además de las formaciones Tablazo, Umir, Simití, Capacho, Gacheta, León, Rio Negro, Rosablanca y Los Cuervos.

**Tabla 3. Potencial de Cuencas Sedimentarias para Shale Gas en Colombia**

		COLOMBIA & VENEZUELA BASINS			
		BASIN	MID MAGDALENA VALLEY	MARACAIBO-CATATUMBO	LLANOS
ERA	PERIOD	EPOCH	FORMATION		
CENOZOIC	QUATERNARY	Pleistocene	Alluvium	Alluvium	Necesidad
		Pliocene	Mesa	Quayabo	Quayabo
	TERTIARY	Miocene	Real	Leon	Leon
		Oligocene	Colorado	Carbonera	Carbonera
			Mugrosa		
			Esmeraldas		
		Eocene	La Paz	Mirador	Mirador
		Paleocene	Lisama	Los Cuervos	Los Cuervos
Barco	Barco				
MESOZOIC	CRETACEOUS	Upper	Umir	Mito Juan	Guadalupe
			La Luna	Colon	Gacheta
			Simiti	Capacho	Une
		Lower	Tablazo	Aguardiente	
			Paja	Apon	
	Rosablanca		Rio Negro		
	Cumbre				
	JURASSIC	Arcabuco/ Giron	Giron		
	TRIASSIC				

Source Rock	Conventional Reservoir	Absent/Unknown
-------------	------------------------	----------------

Fuente: Robles y Cuta

Por último, la **Tabla 4** muestra los resultados de esta caracterización, en la que se muestran valores positivos para los prospectos de shale en Colombia. Existen vastas formaciones (hasta 7200 metros cuadrados) con altos contenidos de materia orgánica y una buena madurez térmica.

**Tabla 4. Características Geológicas de Cuencas Sedimentarias Prospectivas en Colombia**

Datos Básicos	Cuenca Sedimentaria	Valle del Magdalena Medio (13,000 millas cuadradas)		Llanos Orientales (84,000 millas cuadradas)	Catatumbo (23,000 millas cuadradas)			
	Formación de Shale	La Luna/Tablazo		Gachetá	La Luna/Capacho			
	Era Geológica	U. Cretaceo		U. Cretaceo	U. Cretáceo			
	Ambiente Deposicional	Marino		Marino	Marino			
Dimensionamiento	Area Prospectiva (m2)	2390	200	1820	7280	4290	5840	
	Espesor (ft)	Bruto	1000	1000	600	1000	1000	1000
		Neto	300	300	210	500	500	500
	Profundidad (ft)	Intervalo	3,300 - 16,400	3300-10000	13000 - 16400	5000-15000	5500 - 15000	6000 - 15000
Promedio		10000	8000	14500	10000	11,000	12000	
Propiedades de Yacimiento	Presión de Yacimiento	Altamente Sobrepresionado	Altamente Sobrepresionado	Moderadamente Sobrepresionado	Normal	Normal	Normal	
	Contenido de Materia Organica (TOC %)	5.00%	5.00%	2.00%	5%	5%	5%	
	Madurez Térmica (%Ro)	0.85%	1.15%	0.85%	0.85%	1.15%	1.60%	
	Contenido de Arcillas	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	
Recurso	Fase Gaseosa	Gas Asociado	Gas Húmedo	Gas Asociado	Gas Asociado	Gas Húmedo	Gas Seco	
	Concentración de gas In Situ (BCF/mi2)	88	150.3	40.4	71.8	176.1	255.7	
	Gas in Situ (TCF)	117.8	16.8	18.2	183	264.4	522.6	
	Situ Recuperable (TCF)	14.1	4.2	1.8	18.3	52.9	130.7	

Fuente: Robles y Cuta (Adaptado)

## 5. CONCLUSIONES

- El gas natural proveniente de las *shale plays* es una fuente alterna no convencional de recurso energético que representa la posibilidad de un nuevo posicionamiento para los Estados Unidos de América, generando una revolución mundial en cuanto la repartición de los recursos energéticos del mundo.
- Los Estados Unidos actualmente son pioneros en la extracción de gas natural mediante fracturamiento hidráulica o *fracking*, que consiste en generar grietas en el subsuelo en las formaciones de esquisto mediante la inyección de líquidos hidráulicos a altas presiones.
- Se cuenta con más de 10 años de experiencia en la aplicación de la técnica de *fracking* en los Estados Unidos, con lo cual se ha podido establecer una serie de consecuencias negativas para el agua, la salud humana, la flora, la fauna, el territorio y la atmósfera.
- El líquido hidráulico empleado en la técnica de *fracking* está compuesto de agua, arena y una serie de aditivos químicos que presentan y describen ciertos riesgos químicos para el medio ambiente, involucrando ecosistemas acuáticos y terrestres, ya que muchos de ellos son tóxicos, cancerígenos y peligrosos al medio ambiente. La recuperación de los agentes químicos no es completamente efectiva lo que representa daños al medio ambiente, ya que son sustancias que de forma natural no debe encontrarse en el subsuelo.

- Las principales consecuencias del mal uso de la técnica de *fracking*, es decir, de la no apropiada metodología en el proceso se manifestaran en agua y/o atmosferas cercana a los yacimientos.
- La fracturación de pozos, para llevar a cabo la implementación de la técnica de *Fracking* para los procesos de extracción de gas natural de rocas de esquistos pueden ser actividades causante de movimientos sísmicos en área cercanas a la plataforma de perforación, por lo que se requiere de estudios previos al proceso de fracturación y evaluación de los impactos tras la implementación total de la técnica.

## 6. RECOMENDACIONES

- Aplicar este tipo de estudios a los ecosistemas Colombianos, debido a que se ha demostrado que Colombia tiene una gran prospectividad en este tipo de recursos no convencionales. Es importante que los estudios futuros en el área puedan aterrizar en conceptos autóctonos y definir posibles impactos ambientales particulares para nuestra región.
- Esta investigación puede servir como base para sentar un marco legal, el cual permita una explotación de estos recursos no convencionales de manera ambientalmente responsable.
- Apenas empiecen los proyectos comerciales de *Shale Gas* en Colombia, es de vital importancia que se corran análisis a las aguas potables en las zonas cercanas, al aire que se respira y a la sísmica de la región. Monitorear los impactos de cerca es una de las mejores maneras para idear estrategias de mitigación.

## BIBLIOGRAFÍA

Annual Energy Outlook 2015 - U.S Energy Information Administration. Pag D-14.

Arthur, J. D., Bohm, B. K., & Cornue, D. (2009, January). Environmental considerations of modern shale gas development. In SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers.

BACHETTA, Victor. Geopolítica del Fracking. Nueva sociedad. N° 244.

Batley, G. E., & Kookana, R. S. (2012). Environmental issues associated with coal seam gas recovery: managing the fracking boom. *Environmental Chemistry*, 9(5), 425-428.

BOWKER, K. A., 2007, Barnett Shale gas production, Fort Worth Basin: Issues and discussion: *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 91, no. 4, p. 523-533

BRODYLO, John, et al. The Stability of Fault Systems in the South Shore of the St. Lawrence Lowlands of Quebec: Implications for Shale Gas Development. En *Canadian Unconventional Resources Conference*. Society of Petroleum Engineers, 2011.

BURGOS, Asamblea contra la fractura hidráulica. La extracción de gas no convencional y la fractura hidráulica permisos en Burgos. 2011.

CALZONIT, Silvia. Impacto de la extracción de gas shale en Coahuila. *Perspectiva insumo – producto*. Universidad autónoma de Coahuila. 2013

CAVAZZOLI, Gustavo. RACHID, Raúl. Evaluación y producción de gas no convencional-shale gas, 2010"

CHACÓN, Jairo. Colombia, en la era de los esquistos. El espectador. Bogotá: 2014

CONNOR, J. A., et al. Environmental Issues and Answers Related to Shale Gas Development. En SPE Latin American and Caribbean Health, Safety, Environment and Sustainability Conference. Society of Petroleum Engineers, 2015.

Coughlin, B. J., & Arthur, J. D. (2011, January). Cumulative impacts of shale-gas water management: considerations and challenges. In SPE Americas E&P Health, Safety, Security, and Environmental Conference. Society of Petroleum Engineers.

Council, G. W. P. (2011). ALL Consulting (2009) Modern Shale gas development in the United States: a primer. Preparé pour: US Department of Energy et Office of Fossil Energy.

Davies, R. J., Mathias, S. A., Moss, J., Hustoft, S., & Newport, L. (2012). Hydraulic fractures: How far can they go?. Marine and petroleum geology, 37(1), 1-6.

DAVIES, Richard, et al. Induced seismicity and hydraulic fracturing for the recovery of hydrocarbons. Marine and Petroleum Geology, 2013, vol. 45, p. 171-185.

DE PATER, C. J.; BAISCH, S. Geomechanical study of Bowland Shale seismicity. Synthesis Report, 2011, p. 57.

DIGIULIO, Dominic C., et al. Investigation of ground water contamination near Pavillion, Wyoming. Office of Research and Development, National Risk Management Research Laboratory, 2011.

DUCK, BW. 1983. Petróleo, extracción y transporte marítimo. En Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo , 3ª edición. Ginebra: OIT.

ECOPETROL, El Petróleo y su mundo. Disponible en: [www.ecopetrol.com.co](http://www.ecopetrol.com.co)

ECURED. Esquisto. Curso de Universidad para Todos EcuRed, una enciclopedia colaborativa en la informatización de la sociedad cubana. 2011

ELLSWORTH, William L. Injection-induced earthquakes. Science, 2013, vol. 341, no 6142, p. 1225942.

FERRARI, Luca. Pico del petróleo convencional y costos del petróleo no convencional (Fracking). Alianza Mexicana contra el Fracking. México 2014.

Finkel, M. L., & Law, A. (2011). The rush to drill for natural gas: a public health cautionary tale. Public Health, 101(784).

FONTENOT, Brian E., et al. An evaluation of water quality in private drinking water wells near natural gas extraction sites in the Barnett Shale Formation. Environmental Science & Technology, 2013, vol. 47, no 17, p. 10032-10040.

HITZMAN, Murray. Induced Seismicity Potential of Energy Technologies. EnAPS March Meeting Abstracts. 2013. p. 9002.

HOWARTH Robert W., SANTORO Renee y INGRAFFEA Anthony: «Methane and the Greenhouse Gas Footprint of Natural Gas from Shale Formations» end Climatic Change Letters vol. 106 N° 1

HUBBERT M. King. The coming global oil crisis. A Scientific American Book, 1971, pg. 39. [online] Disponible en <http://www.hubbertypeak.com/hubberty/>. Visitada el 26 de febrero de 2015

Jackson, R. B., Vengosh, A., Carey, J. W., Davies, R. J., Darrah, T. H., O'Sullivan, F., & Pétron, G. (2014). The environmental costs and benefits of fracking. *Annual Review of Environment and Resources*, 39, 327-362.

JACKSON, Robert B., et al. Increased stray gas abundance in a subset of drinking water wells near Marcellus shale gas extraction. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, vol. 110, no 28, p. 11250-11255.

Jenner, S., & Lamadrid, A. J. (2013). Shale gas vs. coal: Policy implications from environmental impact comparisons of shale gas, conventional gas, and coal on air, water, and land in the United States. *Energy Policy*, 53, 442-453.

KERANEN, K. M., et al. Potentially induced earthquakes in Oklahoma. USA: Links between wastewater injection and the, 2011, p. 699-702.

KIBBLE, A., et al. Review of the public health impacts of exposures to chemicals and radioactive pollutants as a result of shale gas extraction: draft for comment. *Public Health England Tech. Rep. PHE-CRCE-002*, London, UK, 2013.

Moore, C. W., Zielinska, B., Pétron, G., & Jackson, R. B. (2014). Air impacts of increased natural gas acquisition, processing, and use: A critical review. *Environmental science & technology*, 48(15), 8349-8359.

MYERS, Tom. Potential contaminant pathways from hydraulically fractured shale to aquifers. *Groundwater*, 2012, vol. 50, no 6, p. 872-882.

NICOT, Jean-Philippe; SCANLON, Bridget R. Water use for shale-gas production in Texas, US. *Environmental science & technology*, 2012, vol. 46, no 6, p. 3580-3586.

OSBORN, Stephen G., et al. Methane contamination of drinking water accompanying gas-well drilling and hydraulic fracturing. *proceedings of the National Academy of Sciences*, 2011, vol. 108, no 20, p. 8172-8176.

Peduzzi, P., & Harding Rohr Reis, R. (2013). Gas fracking: can we safely squeeze the rocks?. *Environmental Development*, 6, 86-99.

PETROLEUM, British. *BP statistical review of world energy*. 2015.

Polczer, S.: "Shale Expected to Supply Half of North America's Gas," *Calgary Herald*, 9 April 2009.

ROBLES Emmanuel y CUTA Gerson. Evaluación de estrategias técnicas para pronosticar la producción en yacimientos de gas shale. Tesis de Grado, Ingeniería de Petróleos, Universidad Industrial de Santander, 2013.

SAKMAR, Susan L., et al. Shale gas development in North America: An overview of the regulatory and environmental challenges facing the industry. En *North American Unconventional Gas Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers, 2011.

*Shale Gas Developments in North America: An Overview of the Regulatory and Environmental Challenges Facing the Industry*. State and Federal Regulation of Hydraulic Fracturing: A Comparative Analysis. Hydraulic Fracturing and Safe Drinking Water Act Regulatory Issues, Congressional Research Service 2013

SIEMINSKI, Adam. Outlook for US shale oil and gas. En PowerPoint presentation, IAEE/AEA Meeting, Philadelphia, PA. 2014.

TOLLEFSON, J. Air sampling reveals high emissions from gas field. Nature 482. P.139-149. 2012

VESGA Jenniffer. Efectos Ambientales del Shale Gas. Tesis de Grado, Ingeniería de Petróleos, Universidad Industrial de Santander, 2013.

Vidic, R. D., Brantley, S. L., Vandenbossche, J. M., Yoxtheimer, D., & Abad, J. D. (2013). Impact of shale gas development on regional water quality. Science, 340(6134), 1235009.

ZOBACK, Mark D. Managing the seismic risk posed by wastewater disposal. Earth, 2012, vol. 57, no 4, p. 38.