

Generación de un Análisis Conceptual sobre las Concentraciones de Actividad de Radionucleidos Naturales en Proyectos de Roca Generadora

David De Cuba Daza y Javier Eduardo Rojas Prieto

Trabajo de Grado para Optar el Título de ingeniero de petróleos

Director

Oscar Vanegas Angarita

Ingeniero de petróleos.

Codirector

Reinel Andres Echavez Marquez

Ingeniero de petróleos.

Universidad Industrial de Santander

Facultad de ingenierías fisicoquímicas

Escuela de ingeniería de petróleos

Bucaramanga

2021

Dedicatoria

A Dios por encima de todo por permitirme llegar a este punto y culminar los estudios de la mejor manera posible, a mis padres y hermano por la compañía durante todos estos años y enseñarme a ser la persona que soy actualmente, a mi familia por siempre estar ahí para mí en los momentos más difíciles, a mi apoyo más importante durante este tiempo, ella que siempre estuvo para mí cuando más lo necesite, motivándome y dándome la seguridad de seguir adelante aun cuando no me sentía capaz, gracias.

Agradecimientos

Primero darle la gloria a Dios, darles infinitas gracias a mi Papa Edgar Manuel De Cuba mi mama Aura Esperanza Daza mi hermana Daniela De Cuba por brindarme el apoyo, porque sin ellos no hubiera podido llegar hasta este momento de mi vida, darle gracias a mi familia mis tías mis primos a Esperanza España por brindarme todo su apoyo incondicional a Jeanine Vargas (Nine) que deben estar feliz por este logro, por haberme apoyado y también a mi abuela Benilda Barcinilla por cuidarme desde el cielo, al tío Juan M. Daza, mi tía Lilia, mi tía Maria Eloisa, mi tía Gloria España, mi tía Margarita Barrangan, Vicky Ospino, Rafael España, Edilberto, lilo María por ayudarme en mi formación personal, gracias a Nathalia Venecia por acompañarme en mi proceso universitario, Al ingeniero Oscar Vanegas y al ingeniero Reinel Echavez por siempre ayudarnos con el desarrollo de este proyecto de grado, por los consejos, las ayudas, las correcciones y la confianza dada para culminar este proceso.

Tabla de Contenido

Introducción	11
1. Capítulo 1: Marco de referencia	13
2. Capítulo 2: Proyecto de ley	40
2.1. Proyecto de Ley	48
3. Método	56
3.1 Identificación de isotopos radioactivos.....	56
3.2 Clasificación y riesgo de isotopos radioactivos	57
3.3 Creación de proyecto de ley.....	57
4. Resultados	58
5. Discusión.....	58
6. Conclusiones	59
7. Recomendaciones	61
Referencias Bibliográficas	62

Lista de Tablas

Tabla 1: <i>Concentraciones máximas de contaminantes</i>	33
Tabla 2: <i>Límite de dosis para los trabajadores públicos y ocupacionales</i>	38
Tabla 3: <i>Comparación de radiactividad en las formaciones estudiadas</i>	39

Lista de Figuras

Figura 1: <i>Medición de la radiactividad en productos comunes</i>	14
Figura 2: <i>Posible forma de contaminación de acuíferos en esta zona</i>	26
Figura 3: <i>Medidas de radiactividad en muestras de corazones en Marcellus shale</i>	28
Figura 4: Cadena de desintegración del torio	30
Figura 5: <i>Cadena de desintegración del uranio</i>	31
Figura 6: Dosis efectiva de radiactividad en diferentes actividades.....	35
Figura 7: Comparativa de resultados	58

Glosario

Hidrocarburo: compuesto orgánico natural, que comprende el hidrógeno y el carbono. Los hidrocarburos pueden ser tan simples como el metano [CH₄], pero en muchos casos corresponden a moléculas altamente complejas y pueden presentarse como gases.

Recorte de perforación (ripios): Trozos pequeños de roca que se fracturan debido a la acción de los dientes de la barrena. Los recortes se tamizan a partir del sistema de lodo líquido en las zarandas vibratorias y son monitoreados en cuanto a composición, tamaño, forma, color, textura, contenido de hidrocarburos y otras propiedades

Roca generadora: roca rica en contenido de materia orgánica que, si recibe calor en grado suficiente, generará petróleo o gas. Las rocas generadoras típicas, normalmente lutitas o calizas.

Yacimiento convencional: cuerpo de roca del subsuelo que exhibe un grado el cual presenta una porosidad y permeabilidad para almacenar y transmitir fluidos.

Recorte de perforación (ripios): Trozos pequeños de roca que se fracturan debido a la acción de los dientes de la barrena. Los recortes se tamizan a partir del sistema de lodo líquido en las zarandas vibratorias y son monitoreados en cuanto a composición, tamaño, forma, color, textura, contenido de hidrocarburos y otras propiedades

Potasio (K): Un elemento con un número atómico de 19. El isótopo ⁴⁰K es radioactivo, y decae con la emisión de un solo rayo gamma de 1,46 MeV con una vida media de $1,3 \times 10^9$ años para dar un isótopo estable de argón. El potasio es la fuente más grande de radiactividad natural. Se encuentra presente en la illita, los feldespatos alcalinos, las micas y algunos minerales evaporíticos. También se encuentra presente en algunos sistemas de lodos de perforación.

Torio (Th): Un elemento con un número atómico de 90. El isótopo Th-232 es radioactivo y decae con una vida media de $1,4 * 10^{10}$ años, a través de una serie de isótopos intermedios hasta un isótopo estable de plomo. Los isótopos intermedios emiten un amplio rango de rayos gamma, siendo el más prominente el del talio Tl-208. Se asume que las formaciones se encuentran en equilibrio secular; es decir, las proporciones relativas de isótopos padres e hijas permanecen constantes, y el espectro medido se relaciona directamente con la cantidad de Th-232. La concentración en la corteza terrestre es de unas 12 partes por millón, ppm, en peso.

Uranio (U): Un elemento con un número atómico de 92. El isótopo U-238 es radioactivo y decae con una vida media de $4,4*10^9$ años, a través de una serie de isótopos intermedios hasta un isótopo estable de plomo. Los isótopos intermedios emiten un amplio rango de rayos gamma, siendo el más prominente el del bismuto, Bi-214. Se asume que las formaciones se encuentran en equilibrio secular; es decir, las proporciones relativas de isótopos padres e hijas permanecen constantes, y el espectro medido se relaciona directamente con la cantidad de U-238. La concentración en la corteza terrestre es de unas 4 ppm, en peso.

Resumen

Título: Generación de un análisis conceptual sobre las concentraciones de actividad de radionucleidos naturales en proyectos de roca generadora.

Autor: Javier Eduardo Rojas Prieto, David De Cuba Daza.

Palabras Clave: radiactividad, roca generadora, NORM, radionucleidos.

Descripción:

El presente proyecto de grado tiene como propósito generar un análisis conceptual sobre las concentraciones de actividad de radionucleidos en proyectos de roca generadora, para el cual se cuenta con dos etapas principales, La primera etapa hace referencia a la investigación y determinación de los casos de proyectos de roca generadora con presencia de Naturally Occurring Radioactive Materials o por sus siglas NORM, en esta se encuentra cuáles son los radionucleidos de las diferentes cadenas de desintegración con mayor presencia en estos casos.

Para el segundo capítulo se realiza una investigación donde se determina si los casos planteados anteriormente en el primer capítulo presentan algún riesgo para los trabajadores de la industria petrolera, para esto se establecen los rangos en los cuales las dosis de radiactividad no presentan riesgo alguno a los trabajadores, este rango se obtiene de las diferentes regulaciones gubernamentales de los Estados Unidos. El resultado de este capítulo finalmente es que las dosis de radiactividad no representa un peligro para los trabajadores en ninguna de las formaciones estudiadas.

Por último, se desarrolla la base para un proyecto de ley en Colombia, el cual busca regular las dosis máximas permitidas de concentración y exposición de radiactividad y metales pesados en los proyectos de roca generadora, puesto que es un tema al cual recibe la atención actualmente, es así que con este proyecto de ley se busca principalmente abordar la salud de los trabajadores y las zonas aledañas a estos proyectos.

* Trabajo de Grado

** Facultad de ingenierías fisicoquímicas. Escuela de ingeniería de petróleos. Director: Oscar Vanegas Angarita. Ingeniero de petróleos. Codirector: Reinel Echavez. Ingeniero de petróleos

Abstract

Title: Generation of a conceptual analysis on the concentrations of activity of natural radionuclides in generating rock projects.

Author: Javier Eduardo Rojas Prieto, David De Cuba Daza.

Key Words: radioactivity, generating rock, NORM, radionuclides.

Description:

The purpose of this degree project is to generate a conceptual analysis on the concentrations of radionuclide activity in generating rock projects, for which there are two main stages, The first stage refers to the investigation and determination of the cases of generating rock projects with the presence of Naturally Occurring Radioactive Materials or by its acronym NORM , in this you will find which are the radionuclides of the different chains of disintegration with greater presence in these cases.

For the second chapter an investigation is carried out where it is determined if the cases raised previously in the first chapter present any risk to workers in the oil industry, for this the ranges in which the doses of radioactivity do not present any risk to the workers are established, this rank is obtained from the different government regulations of the United States. The result of this chapter is finally that the doses of radioactivity do not represent a danger to workers in any of the training courses studied.

Finally, the basis for a law project developed in Colombia, which seeks to regulate the maximum permitted doses of concentration and exposure of radioactivity and heavy metals in generating rock projects, since it is an issue to which it is currently receiving attention, so this bill seeks mainly to address the health of workers and the areas surrounding these projects.

* Degree Work

** Facultad de ingenierías fisicoquímicas. Escuela de ingeniería de petróleos. Director: Oscar Vanegas Angarita. Ingeniero de petróleos. Codirector: Reinel Echavez. Ingeniero de petróleos

Introducción

Como bien es conocido Colombia está en un proceso de estudio e investigación en yacimientos no convencionales, esto con el fin de aumentar la producción de hidrocarburos del país, sin embargo, con la extracción de estos hidrocarburos no convencionales se deben tener en cuenta algunos factores. Uno de estos se encuentra relacionado a la radiactividad natural y a los metales pesados presentes en la roca generadora, es este factor uno de los temas a tratar en la actualidad debido a la controversia que se genera en torno a esta. Se encuentra que los riesgos que pueden llegar a generar tales radioisotopos podrían ser perjudiciales para el medio ambiente, dependiendo de las concentraciones halladas, estos pueden afectar suelos, aguas subterráneas, superficiales y por ende a los seres vivos. Otro de los puntos a tratar sobre este factor es la falta de información existente respecto a la radiactividad natural en yacimientos de petróleo, pues la documentación existente sobre este fenómeno en español es escasa, dificultando el abordaje de este tema. Es por esto que se consideraría de suma importancia darles atención a los yacimientos no convencionales.

Por otra parte, la inexperiencia de Colombia en procesos como lo es el fracturamiento hidráulico multietapa en roca generadora podría llegar a tener consecuencias perjudiciales si no se consideran aspectos ambientales que ayuden a detectar y manejar las concentraciones y dosis percibidas de radiactividad natural y metales pesados, los cuales pueden estar presentes en la tubería de producción, aguas de formación, producción y, por supuesto, en la de retorno una vez es aplicado el fracturamiento hidráulico, generando así, posibles dosis con niveles de toxicidad considerables para afectar la salud de los trabajadores de la industria.

Es entonces, a partir de lo anterior, que es de suma importancia poseer un documento en el cual se puedan encontrar conceptos básicos y una clasificación de casos a nivel mundial que

puedan ser comparados con las futuras concentraciones de actividad y dosis radiactivas a medir en campos colombianos. Esto con el fin de preservar tanto la salud del medio ambiente y, por supuesto, la salud de los trabajadores y comunidades cercanas a las zonas de explotación, además ser la base de futuros trabajos en esta temática. Es también un gran aporte para la industria petrolera, debido que actualmente se encuentra en estudio y viabilidad la extracción de hidrocarburos en roca generadora, este trabajo de grado permitirá explicar y comprender un tema tan relevante, que requiere especial atención, como lo son los radionuclidos naturales y los metales pesados, así como redactar un proyecto de ley que será propuesto al congreso de la república con el fin de establecer los valores de dosis máxima permitida en los proyectos de roca generadora.

1. Capítulo 1: Marco de referencia

Radioactividad

La radiactividad fue descubierta por Henri Becquerel en 1896 cuando intentaba averiguar si los materiales fosforescentes emitían rayos similares o no. Becquerel descubrió que las sales de uranio emitían rayos que podían pasar a través de una lámina de metal o un vidrio delgado; convirtiéndose así el primer científico en proporcionar evidencia de que parte de la radiación emitida por el uranio y sus sales eran similares en propiedades a los electrones. Más tarde, en 1898, Marie Curie descubrió que no solo el uranio emitía aquellos rayos, si no que el torio también lo hacía. Pierre y Marie Curie observaron que la intensidad de los rayos espontáneos emitidos por el uranio y el torio incrementaba a medida que la cantidad de uranio y torio incrementaba. De esta manera, concluyeron que estos rayos eran propiedad de los átomos de uranio y torio, con esto decidieron acuñar estas sustancias como radioactivo. Adicionalmente, encontraron otro elemento radioactivo con propiedades químicas similares al bismuto al cual llamaron polonio y, más tarde, otro con propiedades químicas cercanas al bario al que nombraron radio, del latín “radius” que significa “rayo” (Echavez, 2021).

La radiactividad es la espontánea emisión de energía (radiación) y a veces de partículas subatómicas dadas por átomos inestables. La radiación se convierte en un punto de especial atención cuando estas partículas entran en contacto con moléculas en el interior del cuerpo humano, pues esta interacción puede resultar en daño celular o la muerte. La radiactividad se puede encontrar en todas partes en el universo, incluso dentro del cuerpo humano. El grado de radiactividad varía enormemente entre diferentes materiales, ejemplo de esto pueden ser la comida e incluso la cerveza que poseen radioactividad, pero generalmente a niveles extremadamente bajos que no son detectables, a menos que se mida con equipos de laboratorio muy sensibles. De hecho

el 0.01% de todo el potasio, un mineral vital para todos los seres vivos, es radiactivo (Marcellus Shale, 2011).

A continuación en la figura 1 se muestra la medición de la radiactividad en productos comunes, esto con el fin de mostrar cómo se interactúa con este tipo de sustancias en el día a día.

Figura 1

Medición de la radiactividad en productos comunes

productos	K-40	Ra-226
	Bq/g	Bq/g
banana	0.13024	0,000037
nueces de Brasil	5,6	0.037-0.259
zanahoria	0,1258	0,0000222- 0,0000074
patatas blancas	0,1258	0,000037- 0,0000925
cerveza	0,01443	--
carne roja	0,111	0,0000185
frijol	0,17168	0,000075- 0,0000185
Agua	--	0,00000629

Nota. La figura muestra los valores de radioactividad de diferentes productos. Tomado de: Understanding Naturally Occurring Radioactive Material in the Marcellus Shale A discussion of the naturally occurring radioactive material resulting from natural gas drilling in the Marcellus Shale (p.2), por Marcellus Shale, 2011.

Unidades de medición.***Curie (Ci).***

La cantidad de cualquier material radiactivo que produce $3,7 \times 10^{10}$ desintegraciones por segundo (dps).

Bequerelio (Bq).

Una unidad de radiactividad definida como 1 dps. El becquerel es la unidad estándar internacional (SI) de medición de radiactividad igual a 27,03 pCi.

Rad.

Unidad de dosis absorbida definida como la cantidad de radiación o energía absorbido por unidad de masa. Un rad equivale a 100 ergios por gramo de material.

Rem.

La dosis de cualquier radiación ionizante. Que producirá un efecto biológico equivalente al producido por 1 roentgen (medidor de efectos de radiación ionizante, se utiliza para medir la radiación radiométrica) de rayos x o radiación de rayos gamma.

Roentgen (R).

La cantidad de radiación de rayos x o rayos gamma que producirá 1 unidad electrostática de carga o bien 1 centímetro cubico de aire seco a condiciones estándar de presión y temperatura, equivalente a $2,58 \times 10^{-4}$ (Fisher, 1995).

Sievert (Sv).

Describe la cantidad de radiación absorbida por una persona, ajustada para representar el tipo de radiación recibida y el efecto en órganos específicos (EPA, 2021).

Tipos de radioactividad.***Emisión de partículas alfa.***

Las partículas alfa (α), tienen una gran masa comparada con otras partículas radiactivas, y constan de dos protones y dos neutrones emitidos desde el núcleo de un átomo inestable. Los límites de tamaño y carga de partículas alfa y su penetración son a muy corta distancia. La mayoría de las partículas alfa son detenidas por unos centímetros de aire, una hoja de papel, o la capa exterior (muerta) de piel del ser humano. Aunque su tamaño y energía los hace potencialmente una de las partículas más radiactivas peligrosas, se bloquea fácil y generalmente no es de mucha preocupación a menos que el material que emite se ingieren o se inhale (Marcellus Shale, 2011).

Emisión de partículas beta.

Las partículas betas (β) son el equivalente a los electrones energéticos y tienen una masa significativamente menor y la mitad de la carga eléctrica de partículas alfa. Debido a que no tienen tanta carga, las partículas beta no tienen muchas interacciones con otras partículas. Por lo tanto, viajan más lejos antes de entregar toda su energía y descansar. Las partículas beta tienen una baja capacidad de penetración, su rango típico en el aire es de hasta aproximadamente 10 pies. En tejido humano, las partículas beta pueden viajar sólo un centímetro más o menos, por lo que son principalmente de interés para los ojos y la piel, además puede ser un peligro interno si se ingiere el material que las emite. (Marcellus Shale, 2011)

Emisiones de rayos gamma.

Las partículas Gamma (γ) o rayos X. La radiación está hecha de fotones, que viajan a la velocidad de la luz y no tienen carga eléctrica ni masa, como resultado, es menos probable que interactúen con cualquier cosa, dándoles muy alto poder penetrante y permitiéndoles viajar a

grandes distancias a través de diferentes materiales. Debido a su alta penetración energética, la radiación gamma puede provocar en exposición a la radiación a todo el cuerpo en lugar de una pequeña área de tejido cerca de la fuente (Nelson et al. , 2015).

TENORM

La Asociación Internacional de Productores de Petróleo y Gas (IAOGP) definió NORM como radionucleidos naturales que están presentes en concentraciones variables en la corteza terrestre y pueden concentrarse, como también mejorarse mediante procesos asociados con la producción de petróleo y gas. Estos NORM “mejorados” a menudo conocidos como TENORM, se pueden crear cuando las actividades industriales aumentan las concentraciones de materiales radiactivos o cuando el material se redistribuye debido a la intervención humana o algunos procesos industriales (IAOGP, como se citó en Al Nabhani & Khan, 2020).

El enriquecimiento artificial de NORM en la industria del petróleo y el gas puede surgir de muchas formas diferentes como resultado de las tecnologías de recobro mejorado y otras prácticas industriales utilizadas durante la exploración de petróles, gas y actividades de producción. Por ejemplo, durante los procesos de exploración, los métodos de cartografía por teledetección y la sísmica explosiva asociados con los procesos de exploración sísmica pueden mejorar la concentración de actividad de NORM. Además, el mejoramiento de los NORM puede verse afectado por las operaciones de perforación y las actividades de registro de pozos como: registro de neutrones inducido y trazadores radiactivos que se utilizan para evaluar la formación y la eficacia de la cementación de pozos, agua subterránea y dirección del flujo del crudo; tecnologías de recobro mejorado que incluyen procesos de estimulación del pozo como acidificación, perforación y actividades de fracturamiento hidráulico en donde utilizan agua producida mezclada con materiales radiactivos, pues contiene altos niveles de concentración de actividad de NORM

como un medio para fracturar la zona productora y, en consecuencia, mejora la concentración de actividad de NORM que ya existen en esas formaciones rocosas fracturadas (Al Nabhani & Khan, 2020).

Radionucleidos

Los radionucleidos se caracterizan por tener una vida media finita, que puede ir desde pequeñas fracciones de segundo a miles de años. De hecho, algunos de ellos tienen una semivida tan larga que aún no se ha podido cuantificar experimentalmente e incluso se han considerado inestables y para ciertas aplicaciones prácticas, estables. De los nucleidos conocidos en la actualidad hay noventa teóricamente estables y doscientos cincuenta y cinco a los que no se les ha observado desintegrarse.

Los radionúcleidos se pueden presentar en la naturaleza o producir en el laboratorio. En el campo de la medicina, se usan en las pruebas de imagenología y para tratamiento, también llamado radioisótopo (Planas, 2015).

NORM en la Industria del Petróleo

Material radiactivo de ocurrencia natural o Naturally-Occuring Radioactive Materials (NORM), que existen en todos los medios naturales: suelos, roca, agua e incluso en el aire. Los NORM suele estar presente en altas concentraciones en esquistos gasíferos y puede ser llevado a superficie mediante los ripsos de perforación y otros desechos de petróleo o pozos de gas.

En la naturaleza existen elementos radiactivos con semivida del orden de la edad de la Tierra, por lo que la vida ha coexistido con la radiactividad desde su aparición en la Tierra. Estos elementos radiactivos con una semivida tan grande son conocidos como “radionucleidos padres” y tienen una característica conocida como equilibrio secular, la cual, existe cuando el núcleo original tiene una vida media extremadamente larga. Para la serie de uranio con U-238 (con una

vida media de 4,47 mil millones de años), donde todos los elementos de la cadena están en equilibrio secular, cada uno de los descendientes ha acumulado una cantidad de equilibrio y toda la descomposición a la tasa establecido por el padre original. La única excepción es el elemento estable final (plomo-206) en el extremo de la cadena. Teniendo en cuenta lo anterior, para que un radionucleido pueda ser considerado de ocurrencia natural, al menos debe poseer alguna de las siguientes condiciones: el radionucleido estaría producido continuamente en la Tierra o en su atmosfera por un fenómeno natural, el radionucleido tendría una vida muy grande, del orden de $\geq 10^9$ años, el radionucleido tendría un radionucleido de corta vida en equilibrio secular con un radionucleido padre de ocurrencia natural (L'Annunziata, 2020).

Los materiales radiactivos son comunes en el suelo y las formaciones geológicas, que contienen gas y petróleo, puesto que el agua entra en contacto con estos hidrocarburos debido a su proceso de producción. Los campos de petróleo y gas suelen ser producido en acuíferos de agua connata que contiene salmuera, llamada “agua de formación”. La extracción y procesamiento de muchos de estos recursos pueden traer esos radionucleidos de origen natural junto al agua de formación. El proceso de extracción de esquistos de gas con el uso de tecnología de fracturamiento hidráulico multietapa en roca generadora, es un ejemplo prometedor para el alto concentrado de NORM y minerales disueltos durante el proceso de explotación cuando el petróleo, el gas y el agua de formación se bombean a la superficie. La capacidad de movilidad de los isotopos radiactivos encontrados en las formaciones rocosas es fundamental para que puedan entrar en contacto con otros materiales (Rowan, et al., 2011).

El U-238 y el Th-232 son parte de la matriz rocosa, combinado con ella, es básicamente insoluble en el fluido de formación en las típicas condiciones hipóxicas del “*shale*”. El Ra-226 pertenece a la cadena del U-238 y el Ra-228 pertenece a la cadena del Th-232. Ambos isótopos de

radio son altamente solubles, por lo tanto, puede disolverse en agua de poro y fluido de fracturación hidráulica (Smith 1992; Abdeen y Khalil, como se citó en Al Nabhani & Khan, 2020). El radio sólo es moderadamente soluble en agua y sólo bajo ciertas condiciones geoquímicas; el radio-226 y el radio-228 son igualmente solubles. El radio puede entrar en las aguas subterráneas por disolución de materiales acuíferos, por desorción de superficies rocosas o sedimentos y por eyección de minerales durante la desintegración radiactiva (*Fact Sheet*, 1998). A medida que el radio decae, la radiación que se emite puede despojar a los electrones de los átomos con los que colisiona, haciendo que los átomos se carguen o se "ionizen". La radiación alfa y beta ionizante emitida por el radio consiste en partículas que se mueven lentamente y no pueden penetrar en la piel. Sin embargo, si se ingiere radio, especialmente disuelto en agua, la radiación de partículas alfa y beta emitida puede ionizar y dañar el tejido celular. El tejido óseo humano acumula el radio en lugar de permitir que se elimine del cuerpo, exponiendo así los huesos a la radiación alfa o beta que daña el tejido. El daño causado por la exposición continua puede causar cáncer. Debido a que se acumula en el cuerpo, se considera que el radio representa un mayor riesgo de cáncer que la mayoría de los otros elementos radiactivos (*Fact Sheet*, 1998). Luego pueden volver a la superficie después de la fracturación hidráulica pudiendo llegar a causar un gran problema tanto en los trabajadores como en las aguas subterráneas (Edmiston et al., 2011).

El radio, el cual es considerado uno de los elementos más tóxicos junto con el polonio y el plutonio, suelen ser los radionúclidos más abundantes en el agua de *flowback* (Abdeen y Khalil 1995; Barbot et al., como se citó en Almond et al., 2014).

Una vez que los NORM se extraen de la formación pueden encontrarse en superficie en: Recortes de perforación (cuttings) y lodos de perforación de pizarras negras. Los NORM están presentes en los residuos (fluidos de perforación y fangos) producidos por la perforación inicial,

aunque los niveles son generalmente similares a las de las formaciones en profundidad, y no son un problema específico. Los isótopos de radio (Ra-226 y Ra-228) y sus productos de desintegración pueden estar presentes en el flujo de retorno de agua, y más específicamente en el agua de formación, debido a su mayor solubilidad y pueden ser concentrados en diversos procesos como incrustaciones y lodos, como también, en el agua producida. Los niveles de radiactividad en las aguas producidas son generalmente bajos, pero los volúmenes son grandes. Es un agua con una química compleja, con un alto contenido en sólidos disueltos totales y que contiene haluros, metales, aditivos químicos, compuestos orgánicos y materiales radiológicos producidos durante y tras el proceso de fracturación hidráulica. La mayor parte de la concentración de NORM en el agua producida procede del radio. En general puede decirse que las concentraciones de radio tienden a ser mayores cuanto más salinas son las aguas, aunque alta salinidad no siempre implica presencia de radio.

Los rangos de salinidades en las aguas producidas varían entre 5.000 mg/L y más de 300.000 mg/L de cantidad total de sólidos disueltos. Estas aguas de formación pueden contener concentraciones relativamente altas de sodio, cloruro, bromuro, y otros componentes inorgánicos, tales como el arsénico, bario, otros metales pesados, así como radionucleidos asociados que superan significativamente los valores permitidos para el agua potable. Cuando se eliminan estos materiales en las instalaciones avanzadas de tratamiento de aguas residuales, se crea un desecho sólido concentrado (lodos residuales) que requiere un manejo especial y la eliminación en vertederos debidamente diseñados y regulados. Los componentes radiológicos plantean problemas incluso para las instalaciones de tratamiento avanzado, y cualquiera de los desechos residuales que se crean pueden tener emisiones de radiación gamma superiores a los niveles de fondo.

Otro de los lugares es en las incrustaciones minerales dentro de las tuberías o equipos. Químicamente el radio comporta de manera similar al calcio (Ca), el estroncio (Sr) y el bario (Ba), así, el radio puede coprecipitar fácilmente junto con sales de Ca, Sr y Ba presentes en aguas producidas que tengan un alto contenido de sólidos disueltos para formar incrustaciones en o sobre los equipos de perforación, en tanques de almacenamiento o en fosas de salmuera. En general se encuentran concentraciones mayores de radio en tuberías de la cabeza de pozo y en tuberías de producción cercanas al mismo. El contenido en radio en la mayoría de las incrustaciones varía desde niveles cercanos a los de fondo hasta miles de picocurios por gramo. Aparte del radio, también se producen emanaciones de gas radón, aunque debido a la estructura sólida de la incrustación, que inhibe su liberación, normalmente la fracción de radón liberada supone alrededor de un 5%. Las incrustaciones ricas en radio pueden emitir radiaciones que resulten en exposiciones que afecten al personal que trabaja cerca de dichos equipos.

Por otro lado, se encuentra en acumulaciones de lodos. Los lodos se componen de sólidos disueltos en el agua producida que precipitan por cambios de temperatura y de presión. Los lodos generalmente consisten en compuestos de sílice y material suelto que a menudo contiene aceites, pero también, puede contener grandes cantidades de bario y, al igual que las incrustaciones, Ra-226 y Ra-228. Aunque la concentración de la radiación es más baja en los lodos que en las incrustaciones, los lodos son más solubles y por lo tanto más fácilmente liberados al medio ambiente. Como resultado, suponen un mayor riesgo de exposición. Debido a la naturaleza granular de los lodos, sus emanaciones de radón, alrededor de un 22%, son más altas que las de las incrustaciones.

Por último, en equipos o componentes contaminados. Los niveles de contaminación por NORM en equipos varían ampliamente entre los tipos de equipo y la región geográfica. De acuerdo

con los datos aportados por la industria, aproximadamente el 64% de los equipos de producción de gas y el 57% de los equipos de producción petróleo mostraron radioactividad en o cerca de los niveles de fondo. Los niveles de radiactividad tienden a ser más altos en equipos de gestión de agua. Entre los equipos de procesamiento de gas con niveles más altos se incluyen las bombas de reflujo, bombas de propano, los tanques, otras bombas y las líneas de producción. Los equipos de procesamiento de las plantas de gas están generalmente contaminados en superficie por el Plomo-210 (Pb-210), aunque también puede acumularse gas radón. El gas radón es muy móvil y se concentra principalmente en las fracciones más volátiles del gas (propano y etano) (Diaz, 2014). Hay que tener en cuenta que, a pesar de que los ripsos de perforación no suelen tener valores de radiactividad muy alto, debido a esto no son considerados por la US EPA como desechos peligrosos (Li et al., 2020), lo cual da paso a que se genere una mala gestión de estos ripsos, tal y como sucede en la formación Vaca muerta, donde estos ripsos se encuentran al aire libre, a solo metros de las zonas habitadas más cercanas (Martine, 2021). Generando un riesgo constante a la salud de estas personas, pues estos ripsos, continúan liberando partículas radiactivas al medio ambiente, las cuales son recibidas por los habitantes de las zonas cercanas.

Fracking

El fracturamiento hidráulico multietapa a través de pozos horizontales en roca generadora desde plataforma multipozo, a partir de ahora *fracking*, es un proceso utilizado para crear redes de fractura en las rocas, por lo tanto, los fluidos utilizados en este procedimiento suelen componerse de una mezcla que contiene agua, productos químicos y apuntalantes (sustancias sólidas, como arena), que son inyectados en un pozo en el estrato equivalente al *shale* a alta presión. Este proceso crea una red de pequeñas fracturas, las cuales permanecen abiertas gracias a los apuntalantes, lo que permite que el petróleo o el gas puedan fluir hacia el pozo. En este método de explotación, a

medida que la lutita es fracturada, los fluidos de fracturamiento hidráulico disuelven muchas sustancias atrapadas naturalmente en la roca. Estas sustancias incluyen partículas de material radiactivo de ocurrencia natural (NORM), como el potasio K, el torio Th y el uranio U (Almond, s.f)

En términos generales, las investigaciones muestran que el Ra-226, Ra-228 y Ra-224 en zonas de incrustaciones y lodos presentan variaciones en rangos de concentración entre 0,1 Bq/g hasta 15.000 Bq/g (IAEA, 2003). Cuando los NORM son transportados hasta la superficie, estos permanecen en los ripios de perforación o se encuentran en solución en el agua producida. También bajo ciertas condiciones, precipitan en incrustaciones o lodos. La radiación de estos NORM es débil y no puede penetrar materiales densos como el acero utilizado en tuberías y tanques de agua (Smith, et al., 1996).

Antecedentes

La radiactividad acompaña a la explotación y producción del petróleo desde que se descubrió por primera vez hace más de un siglo en los desechos de la explotación de la industria petrolera (Elster and Geitel, como se citó en Al Nabhani & Khan, 2020). Himstedt y Burton también informaron la presencia de concentraciones de materiales radiactivos naturales (NORM) superiores a las de fondo, en el petróleo extraído. Además, la presencia de estos NORM también fue informada en numerosos estudios de investigación rusos y alemanes entre 1920 y 1930 (Al-Farsi, como se citó en Al Nabhani & Khan, 2020).

En 1981, en el Mar de Norte, los operadores comenzaron a identificar los depósitos de incrustaciones como radiactivos. Las incrustaciones se daban principalmente de los depósitos de minerales, como el carbonato de calcio, el cual se precipita fuera del agua y en el interior de las tuberías y otros equipos. Las mediciones de las incrustaciones del mar del norte contenían Ra-226

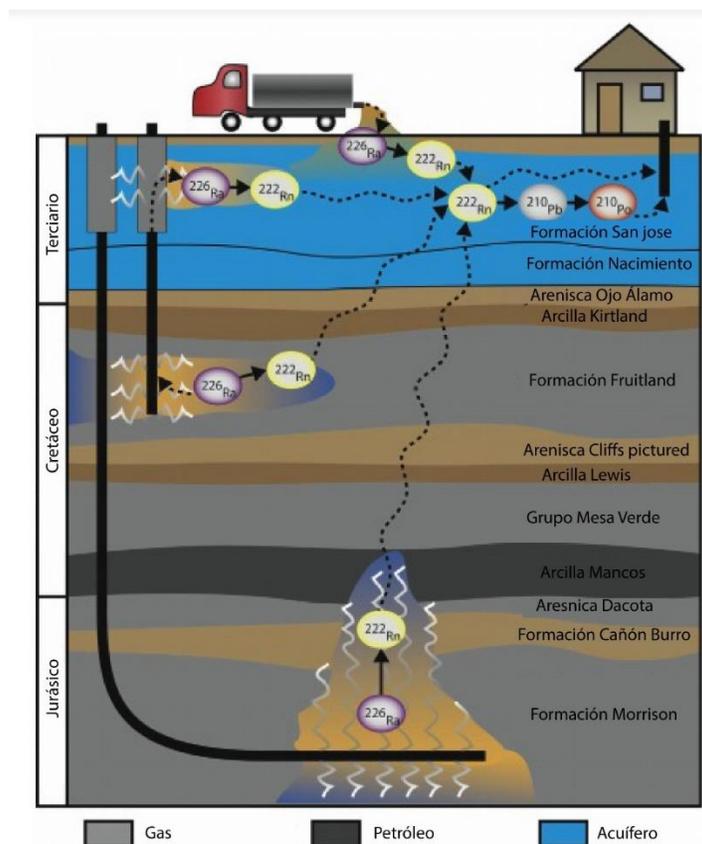
en las concentraciones entre 99,9 Bq/g y 999 Bq/g, además de contener Ra-226 en lodos (lodos resultantes de la mezcla de salmuera y los fluidos de fracturación con la roca) de 4,81 a 48,1 Bq/g. (Marcellus shale, 2011).

En enero del año 2012 se realizaron investigaciones en la cuenca de San Juan en el estado de Colorado, Estados Unidos, allí se aprovecharía la oportunidad de estudiar la movilidad de los NORM en aguas subterráneas debido a las actividades de perforación no convencionales, así pues, el objetivo principal de esta investigación era determinar si los niveles de uranio, plomo y/o polonio cambiaron significativamente al año siguiente de la aplicación de las fracturas hidráulicas en esta zona (Nelson et al., 2015).

Se concluyó que, debido a la poca cantidad de muestras que pudieron obtener, los datos no eran completamente fiables, pero que, si existía la posibilidad de contaminación involuntaria de agua subterránea debido a los NORM presentes en esta zona, mostrando la posibilidad de contaminación en la figura 2 (Nelson et al., 2015).

Figura 2

Posible forma de contaminación de acuíferos en esta zona



Nota. La ilustración muestra la forma en que los acuíferos subterráneos pudieron contaminarse en esta zona con materiales radiactivos. Tomado de: Monitoring radionuclides in subsurface drinking water sources near unconventional drilling operations: A pilot study (p.10), por Nelson, A., Knight, A., Eitrheim, E. & Schultz, M., 2015, *Journal of Environmental Radioactivity*.

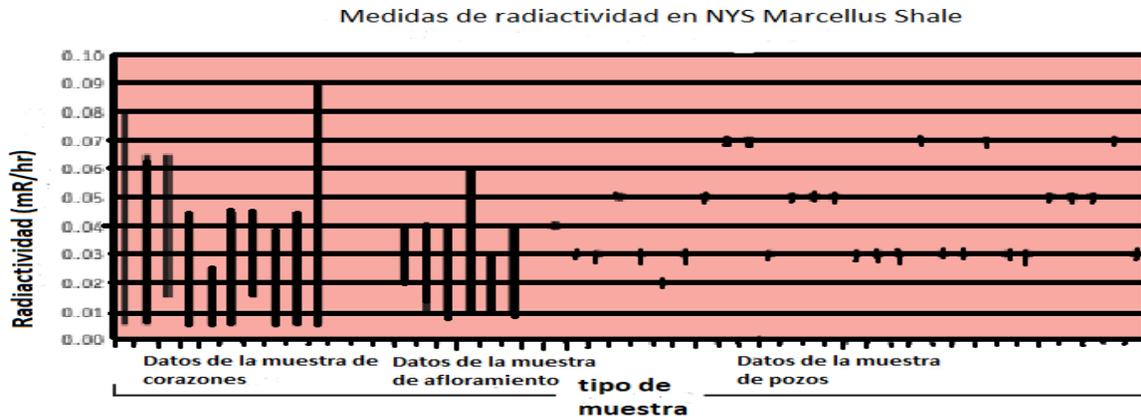
Por otra parte, *Marcellus Shale* es una formación de *Shale* portadora de gas que abarca geográficamente desde Ohio y Virginia Occidental hasta Pensilvania y el sur de Nueva York. Fue depositado hace unos 390 millones de años en el mar poco profundo que una vez cubrió la región. El *Shale* se compone de diminutas partículas de barro y materia orgánica, que, debido a las

propiedades de los elementos radiactivos en el agua de mar, a menudo contiene concentraciones de material radiactivo natural (NORM). Ha habido preocupación de que la perforación en el *Marcellus shale* traerá NORM a la superficie en una forma concentrada, lo que podría representar un peligro de radiación. En esta zona se encontraron materiales radiactivos primarios como lo son K-40, U-238 y Th-232, junto con los productos de su desintegración, esta zona es bastante radiactiva debido principalmente a que es una *Black shale* lo cual genera que el U-238 y U-235 se unan preferentemente a la materia orgánica, como las algas que mueren y se asientan en el fondo del océano. Además, el K-40 y Th-232 se unen preferentemente a las arcillas, que componen gran parte del sedimento en el fondo del océano. En última instancia, debido a que los *Black shale* contienen más materia orgánica y arcillas, generalmente son más radiactivos que otros esquistos o rocas sedimentarias.

Se debe tener en cuenta que en esta zona los datos no son tan contundentes, esto debido principalmente a que hay pocos pozos perforados y además la poca cantidad de muestras que han sido examinadas y reportadas en los estados que delimitan *Marcellus Shale*. (Marcellus Shale, 2011). Aun así, tomando muestras de corazonamiento, muestras de afloramiento y muestras en el pozo se obtuvieron los resultados de la figura 3 de dosis radiactivas en esta zona.

Figura 3

Medidas de radiactividad en muestras de corazones en Marcellus shale



Nota: El gráfico muestra las diferentes medidas de radiactividad en los campos de *Marcellus shale*. Tomado de: Tomado de: Understanding Naturally Occurring Radioactive Material in the Marcellus Shale A discussion of the naturally occurring radioactive material resulting from natural gas drilling in the Marcellus Shale (p.2), por Marcellus Shale, 2011.

En la ilustración se puede observar que el valor más alto es de 0,09 mrem/hr, la cual teniendo en cuenta las regulaciones gubernamentales de Estados Unidos, donde un trabajador ocupacional tiene un límite de 2,5 mrem/hr, se puede observar que es un valor mucho menor al permitido lo cual no debería presentar un riesgo para la salud de ningún trabajador (Marcellus Shale, 2011).

Bowland shale.

En el Reino Unido en la cuenca de Bowland se realizó un estudio en el cual se tuvo en cuenta que se perforarían entre 1 y 10 pozos en 2013. Hasta ahora, se ha perforado, el pozo Preese

Hall. El análisis inicial de la Agencia de Medio Ambiente del fluido de retorno del pozo Preese Hall, registró la presencia del material radiactivo Ra-226, y la concentración más alta registrada fue de 90 ± 12 Bq / kg (Environment Agency, como se citó en Almond et al., 2014).

Silurian Shale.

El pozo Lubien LE-2H se perforó en Lubien, cerca del Voivodato de Pomerania, Polonia. Tiene una profundidad de 4.075 m, con un tramo horizontal de 1.000 m de largo con agua inyectada en el tramo horizontal del pozo (Panstwowy Instytut, como se citó en Al Nabhani & Khan, 2020).

Debido al contacto de este fluido con aguas fuertemente salinas y la formación de lutitas, regresó enriquecido con cloruros y sales de bario (Panstwowy Instytut, como se citó en Al Nabhani & Khan, 2020).

Barnett shale.

Es una provincia de gas de arcilla en el centro norte de Texas, con un reservorio de gas no convencional, donde la cantidad de K-40 de Barnett Shale es alta además de encontrar presencia de Ra-226 y Ra-228 (Willberg et al., como se citó en Al Nabhani & Khan, 2020).

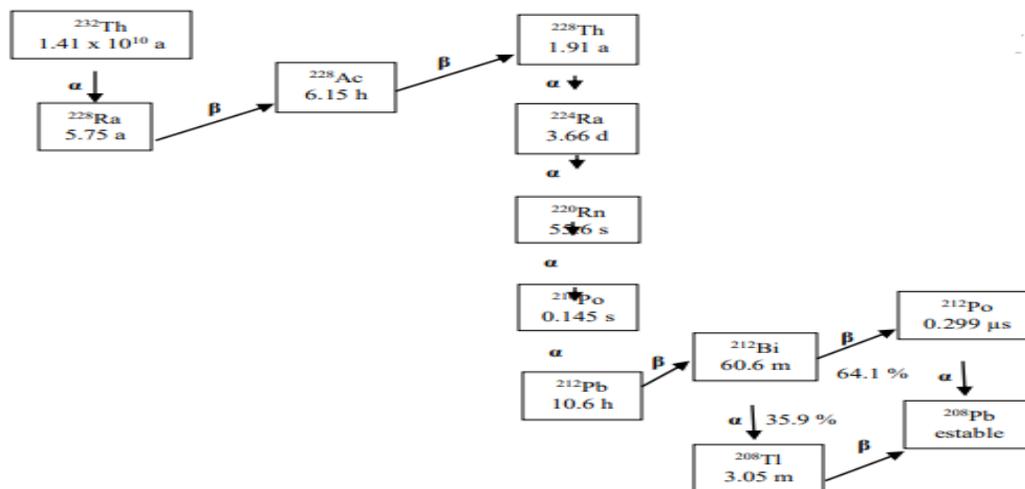
Vaca muerta.

Vaca Muerta es una formación geológica de “shale” situado en la cuenca neuquina en las provincias de Neuquén, Río Negro, La Pampa y Mendoza, en Argentina. La extensión del yacimiento es de 30 000 kilómetros cuadrados. Esta formación se encuentra actualmente bajo el ojo de la prensa argentina debido al mal manejo de los residuos que genera esta formación, puesto que según la Asociación Argentina de Abogados Ambientalistas denunció que existen 401.000m³ de residuos tóxicos sin tratar. Esto combinado con la lixiviación del material, y que al ser volátiles los hidrocarburos, estos emanan gases tóxicos, lo cual es de los hechos más graves de contaminación para las poblaciones cercanas (Centenera, 2020).

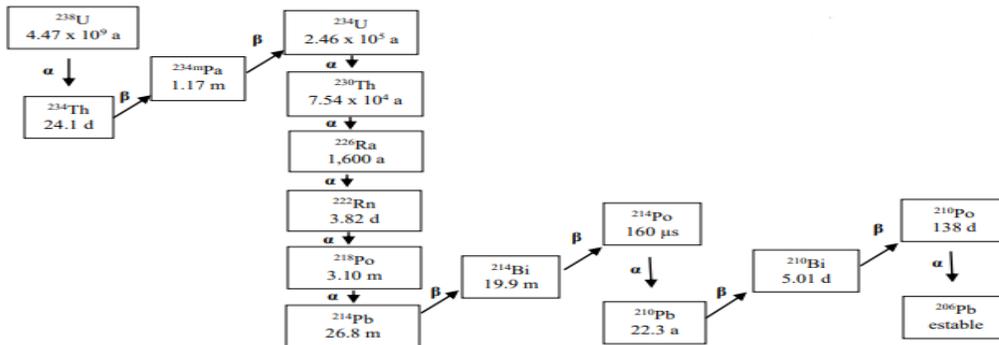
Las cadenas de desintegración de los radionucleidos naturales suelen ser de billones de años, esto debido a las semividas de los componentes, la cual se define como la cantidad de tiempo que le toma a un isótopo dado perder la mitad de su radioactividad (Connor, 2020). Así, existen átomos de estas sustancias que están desde incluso antes de la creación de la tierra, con esto en mente se puede decir que existen los componentes padres y los componentes hijos, los cuales, dependiendo de la reacción, pueden emitir radiación en forma de partículas Alfa, Beta o energía como los rayos gamma en la forma de fotones u ondas electromagnéticas (Al Nabhani & Khan, 2020). Así, a continuación, se mostrará la cadena de desintegración del uranio y torio respectivamente:

Figura 4

Cadena de desintegración del torio



Nota. Cadena completa de desintegración del torio además del tiempo de vida medio y el tipo de enlace de cada uno de los componentes. Tomado de: Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM) in Produced Water and Scale from Texas On., Gas, and Geothermal Wells: Geographic, Geologic, and Geochemical Controls, por Fisher, 1995.

Figura 5*Cadena de desintegración del uranio*

Nota. Cadena completa de desintegración del uranio además del tiempo de vida medio y el tipo de enlace de cada uno de los componentes. Tomado de: Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM) in Produced Water and Scale from Texas On., Gas, and Geothermal Wells: Geographic, Geologic, and Geochemical Controls, por Fisher, 1995.

Teniendo en cuenta las cadenas de desintegración tanto del Uranio como del Torio y además viendo los antecedentes presentados anteriormente se puede observar una tendencia de encontrar mayor cantidad de radionucleidos, tanto de Ra-226 como de Ra-228, teniendo mayor presencia el primero por sobre el segundo de estos componentes radiactivos, debido principalmente a la abismal diferencia que existe entre las semividas de estos dos componentes.

Metales pesados

Los metales pesados son aquellos cuya densidad es por lo menos cinco veces mayor que la del agua. No obstante, no todos los metales de densidad alta son especialmente tóxicos en concentraciones normales, algunos de ellos son necesarios para el ser humano. Sin embargo, hay una serie de metales pesados más conocidos por su tendencia a representar serios problemas medioambientales, algunos de estos son el mercurio (Hg), el plomo (Pb), el cadmio (Cd) y el talio

(Tl), así como el cobre (Cu), zinc (Zn) y cromo (Cr) (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2015).

La peligrosidad de los metales pesados reside en que no pueden ser degradados (ni química, ni biológicamente) y, además, tienden a bioacumularse y a biomagnificarse, lo cual hace que se acumulen en los organismos vivos alcanzando concentraciones mayores de las que alcanzan en los alimentos o medioambiente. Estas concentraciones aumentan a medida que ascendemos en la cadena trófica, provocando efectos tóxicos de muy diverso carácter. En el ser humano se han detectado infinidad de efectos físicos (dolores crónicos, problemas sanguíneos, etc) y efectos psíquicos (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2015).

En la industria petrolera estos metales pesados tienden a acumularse en los ripsos de perforación, los cuales son considerados como desechos o residuos, así pues, se considera residuo o desecho tóxico aquel que en virtud de su capacidad de provocar efectos biológicos indeseables o adversos puede causar daño a la salud humana y/o al ambiente.

Para este efecto se consideran tóxicos los residuos o desechos que se clasifican de acuerdo con los criterios de toxicidad (efectos agudos, retardados o crónicos y ecotóxicos) definidos a continuación y para los cuales, según sea necesario, las autoridades competentes establecerán los límites de control correspondiente: dosis letal media oral (DL50) para ratas menor o igual a 200 mg/kg para sólidos y menor o igual a 500 mg/kg para líquidos, de peso corporal; Dosis letal media dérmica (DL50) para ratas menor o igual de 1.000 mg/kg de peso corporal; Concentración letal media inhalatoria (CL50) para ratas menor o igual a 10 mg/l; Alto potencial de irritación ocular, respiratoria y cutánea, capacidad corrosiva sobre tejidos vivos; Susceptibilidad de bioacumulación y biomagnificación en los seres vivos y en las cadenas tróficas; Carcinogenicidad, mutagenicidad y teratogenicidad; Neurotoxicidad, inmunotoxicidad u otros efectos retardados; Toxicidad para

organismos superiores y microorganismos terrestres y acuáticos; Otros que las autoridades competentes definan como criterios de riesgo de toxicidad humana o para el ambiente (APC, 2015.)

Además, se considera residuo o desecho tóxico aquel que, al realizársele una prueba de lixiviación para característica de toxicidad (conocida como prueba TCLP), contiene uno o más de las sustancias, elementos o compuestos que se presentan en la Tabla 1 en concentraciones superiores a los niveles máximos permisibles en el lixiviado establecidos en dicha tabla.

Tabla 1

Concentraciones máximas de contaminantes

Contaminante	Nivel máximo permisible en el lixiviado (mg/L)
Arsenico	5.0
Bario	100.0
Benceno	0.5
Cadmio	1.0
Tetracloruro de carbono	0.5
Clordano	0.03
Clorobenceno	100.0
Cloroformo	6.0
Cromo	5.0
o-Cresol	200.0
m-Cresol	200.0
p-Cresol	200.0
Cresol	200.0
2,4- D	10.0
1,4-Diclorobenceno	7.5
1,2- Dicloroetano	0.5
1,1- Dicloroetileno	0.7

2,4- Dinitrotolueno	0.13
Endrin	0.02
Heptacloro y sus Epóxidos	0.008
Hexaclorobenceno	0.13
Hexaclorobutadieno	0.5
Hexacloroetano	3.0
Plomo	5.0
Lindano	0.4
Mercurio	0.2
Metoxiclor	10.0
Meti etil cetona	200.0
Nitrobenceno	2.0
Pentaclorofenol	100.0
Piridina	5.0
Selenio	1.0
Plata	5.0
Tetracloroetileno	0.7
Toxafeno	0.5
Tricloroetileno	0.5
2,4,5-Triclorofenol	400.0
2,4,6-Triclorofenol	2.0
2,4,5- TP (silvex)	1.0
Cloruro de vinilo	0.2

Nota. Valores de concentración permitidos para los diferentes contaminantes de los desechos tóxicos. Tomado de Manual de Gestión de los Residuos o Desechos Peligrosos, por APC, 2015.

Riesgos de Exposición

La exposición a niveles muy altos de radiación, por ejemplo, por estar cerca de una explosión atómica, puede causar efectos agudos sobre la salud. Aquí se encuentran: las quemaduras de piel, síndrome de radiación aguda (“radiotoxemia” o “enfermedad por radiación”), cáncer y enfermedades cardiovasculares. Ahora bien, la exposición a los bajos niveles de radiación presentes en el medioambiente no causa efectos inmediatos en la salud (EPA, 2021)

Para tener una dimensión de los efectos dañinos de la radiactividad y su uso común día a día, se muestra en la figura 6, donde se exponen los valores de dosis efectiva y por consiguiente los efectos que estos valores pueden llegar a causar (Cooperativa.cl, 2011).

Figura 6

Dosis efectiva de radiactividad en diferentes actividades

Dosis (milisieverts)	Efecto
0,01 mSv	Radiografía dental.
0,1 mSv	Radiografía de pecho.
0,4 mSv	Mamografía
1,02 mSv	Radiación por hora detectada en Fukushima el 12 de marzo
2 mSv	Radiación que recibimos anualmente de forma natural.
9 mSv	Exposición que una tripulación del vuelo Nueva York-Tokio recibe en un año.
10 mSv	Tomografía axial computarizada de todo el cuerpo.
100 mSv	Límite de radiación recomendado cada cinco años para los trabajadores.
350 mSv	Exposición a partir de la cual fueron recolocados los residentes de Chernobil.
400 mSv	Radiación máxima que emitió la planta de Fukushima ayer, por hora.
1000 mSv	Una sola dosis podría causar vómitos, mareos, náuseas, pero no la muerte.
5000 mSv	Una sola dosis podría matar al 50 por ciento de las personas que se vean expuestas.
6000 mSv	Dosis de los trabajadores de Chernobyl que murieron en un mes.
10000 mSv	El 100 por ciento de las personas que la reciben muere en semanas

Nota. En la tabla pueden observarse valores de radiactividad para diferentes actividades, desde actividades comunes hasta lo generado por plantas nucleares. Tomado de Conozca los niveles de radiación que puede soportar los seres humanos, por Cooperativa.cl (2011).

En el año 2020, en Estados Unidos se realizó un estudio el cual buscaba principalmente encontrar si los pozos no convencionales emitían partículas radiactivas al medioambiente, esto mediante el uso de medidores RadNet, el estudio sugiere que un aumento en las partículas

radiactivas debido al extenso desarrollo de petróleo y gas no convencional (por sus siglas en inglés UOGD) puede causar resultados de salud adversos en las comunidades cercanas al elevar el nivel de las partículas radiactivas. Se necesitan más estudios, especialmente aquellos basados en mediciones de estas partículas cercanas a las actividades de UOGD, para validar esta vía de exposición. El análisis demostró que las actividades de UOGD contra el viento podrían elevar significativamente el nivel de partículas radiactivas en las comunidades a favor del viento. Esto denota que las UOGD tienen un mayor impacto en las partículas radiactivas, en comparación con los métodos convencionales. (Li et al., 2020).

Hay que tener en cuenta lo dañino que es en la salud de las personas, cualquier aumento que haya de partículas radiactivas, como lo evidenció Nyhan et al. (como se citó en Li et al., 2020) donde encontraron que un aumento de $0.07 \text{ mBq} / \text{m}^3$ en la radiación beta bruta promedio de 28 días se asocia con un aumento de 2.95 mm-Hg en la presión arterial diastólica además de un aumento de 3.94 mm-Hg en la presión arterial sistólica, lo cual conlleva a un 2.41% de disminución en la capacidad vital forzada y una disminución del 2,41% en el volumen espiratorio forzado en la población del Estudio Normativo de Envejecimiento (NAS). Blomberg et al. (como se citó en Li et al., 2020) informaron que un aumento de $0.12 \text{ mBq} / \text{m}^3$ en la radiación beta bruta promedio de siete días se asocia con un aumento del 4.9% en la proteína C reactiva, un aumento del 2.8% en la molécula de adhesión intercelular-1 y un 4.3% aumento de la molécula de adhesión celular vascular-1 en la misma población de estudio. (Li et al., 2020)

La radiactividad en el medio ambiente, especialmente la presencia del radio, un carcinógeno reconocido, representa una amenaza potencialmente significativa para la salud humana. Por lo tanto, cualquier actividad que tenga el potencial de aumentar su exposición debe analizarse previamente al inicio de sus operaciones, de manera que los riesgos puedan ser

plenamente comprendidos y reconocidos. Pues, las explotaciones de gases no convencionales tienen la potencialidad de generar grandes cantidades de residuos que contengan Ra-226 y Ra-228, tanto en estado sólido como líquido, debería realizarse un análisis completo de las vías de exposición al público como requisito previo al inicio de sus actividades (Díaz, 2014).

Límite de dosis.

El principio de limitación de dosis significa que nadie debe estar expuesto a un grado inaceptable de riesgo por actividades que impliquen exposición a la radiación. Estos límites de dosis son recomendados por la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) y están establecidos para garantizar que las personas no estén expuestas a una cantidad innecesariamente alta de radiación ionizante. Los límites de dosis son un componente fundamental de la protección radiológica, y el incumplimiento de estos límites es contrario a la regulación de la radiación en la mayoría de los países. No se aplican a una situación de emergencia cuando la vida humana está en peligro (Connor, 2020).

Los límites se dividen en dos grupos, el público y los trabajadores ocupacionalmente expuestos. Según ICRP, la exposición ocupacional se refiere a toda exposición incurrida por los trabajadores en el curso de su trabajo, con la excepción de: exposiciones excluidas y exposiciones de actividades exentas que involucran radiación o fuentes exentas, cualquier exposición médica, la radiación de fondo natural local. La tabla 2 resume los límites de dosis para los trabajadores ocupacionales y para los trabajadores públicos:

Tabla 2*Límite de dosis para los trabajadores públicos y ocupacionales*

Tipo de límite	Trabajador ocupacional	Trabajador público
Límite de dosis efectiva	20 mSv por año, promediado sobre periodos definidos de 5 años.	1 mSv en un año
Límites de dosis equivalente en:		
Lente del ojo	150 mSv	15 mSv
Piel	500 mSv	50 mSv
Manos y pies	500 mSv	-

Nota. Valores de radiactividad permitidos para los trabajadores públicos y ocupacionales. Tomado ¿qué es la vida media radiactiva? por Connor, (2020), <http://www.radiation-dosimetry.org/es/que-es-la-vida-media-radiactiva/>

Clasificación de los casos.

Para hacer una clasificación de los casos mencionados en el enunciado anterior se deben tener en cuenta dos conceptos claves, los cuales serán utilizados para hacer la respectiva clasificación. Estos conceptos son:

Dosis efectiva.

En protección radiológica, la dosis efectiva es una cantidad de dosis definida como la suma de las dosis equivalentes de tejido ponderadas por los factores de ponderación de órganos (tejidos), que tiene en cuenta la sensibilidad variable de los diferentes órganos y tejidos a la radiación (Connor, 2020).

Concentración de actividad.

Esto representa la cantidad de átomos en la desintegración del material en un período dado. Las unidades de medición para la radiactividad son el curie (Ci, unidad estadounidense) y el becquerel (Bq, unidad internacional) (EPA, 2021). Ahora, los casos tenidos en cuenta serían: *Marcellus shale*, *Bowland shale*, *Silurian Shale* y *Barnett shale*.

La clasificación se hará para la actividad del componente que puede llegar a causar un mayor problema como lo es el radio, además de tener en cuenta solamente la actividad en el agua de *flowback*, ya que allí es el punto más crítico de concentración debido a que el material radiactivo se encuentra mucho más en contacto con el personal y pueden llegar a verse afectadas las aguas subterráneas, además de las dosis efectivas de cada uno de los campos se observará en la Tabla 3 a continuación.

Tabla 3

Comparación de radiactividad en las formaciones estudiadas

Formación	Flujo de agua de <i>flowback</i> (Ra-226)	Dosis efectiva
Marcellus shale	0.006031 Bq/L- 593.11Bq/L	0,09 mrem/hr
Bowland shale	0,0019 Bq/L	0,09 mrem/hr
Silurian shale	5,2 Bq/L	0,43 mrem/hr
Barnett shale	6,5 Bq/L	3% de los componentes radiactivos están entre 0,052 mrem/hr y 1,1 mrem/hr

Nota. Tabla comparativa en la cual se muestran los diferentes valores de radiactividad de cada una de las formaciones estudiadas.

Observando la tabla comparativa se puede concluir que los valores de concentración más altos se dan en *marcellus shale*, ya que se observa que es mucho mayor a los de las siguientes formaciones. Ahora, observando las dosis efectivas de las diferentes formaciones estudiadas, ninguna de estas llega a ser un peligro para los trabajadores de la industria ya que como se expuso

en el capítulo anterior, los trabajadores ocupacionales tienen un límite de 2,5 mrem/hr según las regulaciones gubernamentales de Estados Unidos, y todas estas formaciones estudiadas están muy por debajo de este valor. Así, se puede concluir que todas las formaciones estudiadas no representan un problema para los trabajadores de la industria, pero, se deben tener en cuenta las respectivas medidas de seguridad para estas formaciones.

2. Capítulo 2: Proyecto de ley

En el presente apartado de este trabajo se enfocará en la construcción de una propuesta de Ley que podría servir como derrotero para la consolidación de una política petrolera responsable, transparente y democrática; y además de ello, como es el fondo de este trabajo, formular unas disposiciones que regule las dosis máximas permitidas de concentración y exposición de radiactividad y metales pesados en la exploración y producción de yacimientos no convencionales de roca generadora. Donde se dé prioridad e importancia a la salud humana (de trabajadores, población), la vida ecológica de la nación y a las comunidades indígenas vulnerables.

En ese sentido, el primer mensaje que se puede observar es que las disposiciones que se expondrá no son *prohibicionistas*, dado que, se considera viable el ejercicio de “Fracking” en el país. Sin embargo, si es necesario que se establezcan algunos lineamientos generales claros para que esta práctica no sea lesiva a la nación colombiana. De modo que, se estima posible el ejercicio responsable de la metodología de extracción de hidrocarburos no convencionales aplicando la máxima ética y cuidados técnicos pertinentes.

Para efectos de que se entienda la necesidad de regular el “fracking” con unos lineamientos generales claros, es menester exponer previamente al muestrario del Proyecto de Ley, una justificación o motivación que soporte lo que se propondrá. De tal manera, se dará a conocer

información valiosa, que pondrá en contexto lo complejo del tema. Esto a fin de que, se reflexione sobre los pro y contras que se plantan alrededor de la práctica del “fracking”.

Ahora bien, como se aludió arriba, se torna vital la política petrolera responsable, transparente y democrática, por ello, se comenzará la motivación haciendo alusión al tema de los hidrocarburos o a la política petrolera en Colombia, por decirlo de alguna manera, pues es esencial incluirlo.

Exposición de motivos o justificación del Proyecto de Ley por la cual se dictan disposiciones para reformar aspectos de la industria de los hidrocarburos y establecer una regulación en las dosis máximas permitidas de materiales radiactivos y metales pesados en yacimientos no convencionales en Colombia

Colombia es una nación rica en diversos recursos, entre ellos, los hidrocarburos. En lo que concierne al petróleo, el país ha dependido de este de manera significativa para sostenimiento de la economía nacional. En ese sentido, el petróleo es vital para el Estado colombiano, y no por ello, deja de ser complejo su manejo desde la política, el negocio, la producción y la distribución. En otras palabras, el tema de los hidrocarburos es trascendental para la vida diaria nacional, y, además, para la supervivencia energética de la población.

Varios sectores, critican el hecho de que Colombia no tenga un manejo adecuado de la política petrolera. Estos se enfocan en señalar que son las multinacionales y los privados quienes están sacando provecho indiscriminado al petróleo, sin la debida participación de la ciudadanía colombiana, es decir, sin que se esté beneficiando al pueblo con los dividendos que da el negocio.

Tal hecho genera una desazón en varias comunidades de la nación, sobre todo, en las poblaciones que se asientan cercanas de los lugares donde reposan los yacimientos petroleros,

pues muchas veces no los impacta positivamente desde el punto de vista económico, social y convivencial.

A lo dicho, se conoce la postura de que los congresistas, históricamente han sido irresponsables al no generar unas normas (Leyes) que contengan una genuina y creativa política de Estado que entre en sintonía con los intereses económicos, sociales, políticos y ambientales de Colombia, basados en conocimientos rigurosos de las necesidades nacionales. Siguiendo estos con la larga experiencia que se ha acumulado con décadas y décadas en el campo de los hidrocarburos.

Para soportar lo anterior, Colombia ha contado, por mencionar algunas, con la Ley 120 de 1919, la cual define el vocablo hidrocarburos, se estipula la industria que explota este bien, la construcción de oleoductos que son de utilidad pública y se fijan los primeros impuestos para estas actividades. Así también aparece la Ley 37 de 1931 que establece que el petróleo es propiedad de la nación y su explotación sólo se hará al perfeccionarse el contrato conforme a la ley. Además, de establecer las regalías que se generan de las concesiones. Siguiendo, se expide la Ley 160 de 1936 donde se estipulan el reglamento de los términos de concesión entre Estado y particulares, como la actividad de exploración y explotación. Posterior a otras, aparece el Decreto –Legislativo 2310 de 1974 donde se encarga de manera privativa a ECOPETROL sobre las actividades de exploración y explotación, las que podría llevar a cabo directamente o con personas naturales o jurídicas nacionales o extranjeras.

Con la Constitución de 1991 en su artículo 332 “El Estado es propietario del subsuelo y de los recursos naturales no renovables, sin perjuicio de los derechos adquiridos y perfeccionados con arreglo a las leyes preexistentes”. Comedidamente el artículo superior 360 constitucional prescribe:

La explotación de un recurso natural no renovable causará, a favor del Estado, una contraprestación económica a título de regalía, sin perjuicio de cualquier otro derecho o compensación que se pacte. La ley determinará las condiciones para la explotación de los recursos naturales no renovables. Mediante otra ley, a iniciativa del Gobierno, la ley determinará la distribución, objetivos, fines, administración, ejecución, control, el uso eficiente y la destinación de los ingresos provenientes de la explotación de los recursos naturales no renovables precisando las condiciones de participación de sus beneficiarios.

Y leyes que se alinean al artículo 360 son: 141 de 1994, 756 de 2002, 1530 de 2012, entre otras. Todas enfocadas al manejo de las regalías, sin hacer aspiración a fijar los asientos fuertes de una política petrolera rentable, soberana y consistente que garantice a los futuros habitantes colombianos la seguridad energética y los recursos imprescindibles para el desarrollo económico y social.

A todo lo dicho se suma, los impactos ambientales y a la salud que se derivan de la explotación de los hidrocarburos. Si bien el artículo 79 de la Constitución actual fija que: “Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. La ley garantizará la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectarlo. Es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de estos fines”. No es un secreto que en Colombia históricamente, la explotación de ciertos hidrocarburos se ha dado sin el debido control, y sin la vigilancia efectiva, muchas veces, de la Agencia Nacional de Hidrocarburos (entidad encargada de la administración de los recursos petroleros de la nación y de la asignación de las áreas de hidrocarburos para su exploración y explotación, también facultada

para las regalías), que en ocasiones otorga licencias sin el rigor técnico y estudios exhaustivos que se amerita, así, poniendo en riesgo y en el peor de los casos, se ha llegado a afectar medios ambientes vitales para las poblaciones aledañas. Este es otro complejo problema que se debe comenzar a solucionar con seriedad y verdadero compromiso para ser coherente con el discurso y valor constitucional de proteger los ecosistemas.

Todo lo expuesto hasta ahora, son cuestionamientos relevantes a corregir para el presente y futuro de Colombia, pues con una política petrolera o de hidrocarburos éticamente correcta, es decir, transparente, responsable y democrática, haría que el país confíe más en el sector minero (petrolero) sabiendo que tanto privados y el Estado, este último conducido por gobiernos de turno, trabajan siguiendo márgenes de ley que protegen la economía nacional, los ecosistemas y la sostenibilidad energética. Y se eliminaría el panorama al que hace alusión Lopera Castro (1999), al decir que

La empresa estatal es tomada como un intermediario entre el Estado y los empresarios extranjeros, por lo cual sus funciones se limitan a valorizar los recursos (mediante inversiones iniciales en sísmica), para venderlos y generar ingresos para el país. No tiene así aquella (la empresa estatal), un papel protagónico en el descubrimiento de nuevas reservas, ni en la transformación del crudo en productos industriales para consumo nacional y de exportación, sino que, se dedica fundamentalmente a operar campos viejos, viejas refinerías y a recibir la cuota que le corresponde de los campos nuevos para exportar el crudo de mejor calidad al mercado internacional (p. 28).

Ahora bien, el enfoque al que se aspira regular con mayor especificidad es el de las dosis permitidas en materiales radiactivos y metales pesados durante el uso de la técnica conocida como “fracking” en Colombia. Sin embargo, para poder llevar a cabo este proyecto de ley se considera

transcendental, primeramente entender el “fracking” y además que se hagan ciertas reformas, como se señalará en las disposiciones, a aspectos de la legislación de hidrocarburos en Colombia, pues sin estas reformas no sería posible las proposiciones de la regulación al uso del mismo, teniendo en cuenta que esta práctica extractiva es muy debatida en el mundo, y junto a ello, genera polémicas en los países en los que se proyecta ejecutarla. Colombia no es la excepción en esta controversia, y es más controvertida sabiendo que la legislación actual, y la forma como operan ANH (Agencia Nacional de Hidrocarburos) necesitan reformas.

En esta instancia se hará una revisión de ¿qué es el “fracking”? ¿Cuáles son las consecuencias posibles de las que hablan algunos estudiosos? ¿Qué aspectos a favor tiene el “fracking”? ¿Por qué es importante que Colombia lo use aplicando una regulación responsable?

El “Fracking” es una técnica o un método usado para extraer tipos de hidrocarburos no convencionales que se hallan atrapados en las capas de rocas a una gran profundidad de la tierra. El funcionamiento es que se perfora la roca hasta alcanzar el hidrocarburo (por ejemplo, gas esquisto u otros), se inyecta a alta presión abundante cantidad de agua con aditivos químicos y arena para fracturas o romper la roca, y de tal modo, librar el producto.

Ahora, de este ejercicio técnico estudiosos afirman que se derivan algunas consecuencias negativas. Se mencionarán de manera sucinta.

Consecuencias ambientales. La Alianza Mexicana contra el “Fracking”, se refiere a que esta técnica perjudica la calidad del agua potable o apta para el consumo humano. Es decir, esta práctica de fracturación hidráulica contamina las fuentes de agua subterráneas con los aditivos químicos usados en el proceso de inyección, entre los que se encuentran el metanol.

Impacto sobre la salud. Se estima que al menos el 25% de los elementos o sustancias químicas usadas en las maniobras de perforación causarían cáncer y mutaciones. El 37 % de estas

sustancias podrían perjudicar al sistema endocrino. El 40% pueden producir alergias considerables y el 50% generar daños al sistema nervioso.

Emisión de gases y contribución al calentamiento global. Las fugas de metano junto con la mezcla de otros agentes químicos como dióxido de azufre contribuyen al aceleramiento del calentamiento global. El metano es 86 veces superior al CO₂, esto genera la conclusión que en 20 años superara en un 20% a la contaminación del carbón.

Sismos antropogénicos. Los pozos de letrinas, sus aguas, pueden desestabilizar fallas geológicas y provocar sismos considerables. En Estados Unidos, por ejemplo, ciudades que nunca habían presentado actividad sísmica la han venido presentando.

Liberación de elementos radioactivos en el subsuelo. La Revista *Rolling Stone* expone que la radioactividad en el subsuelo es algo normal y natural, siendo inofensiva dado que se encuentra atrapada, sin embargo, lo anormal y peligroso es que se libere por manipulación humana a través de la fracturación del subsuelo, lo cual permitiría que salgan al exterior de la superficie y, pueden ser respiradas o ingeridas por medio del agua. En Estados Unidos, por ejemplo, aún falta investigación para identificar todas las sustancias radioactivas que se pueden generar, lo cual está exigiendo mayor vigilancia, supervisión y estudio por parte del Estado (Las dos Orillas, 2020).

Uniéndolo todo lo anterior, se puede resumir que la práctica del “Fracking”, según sus detractores, eleva el consumo de agua y la pérdida del ciclo hídrico, elevada generación de desechos tóxicos y dificultades para su manejo, contaminación atmosférica, migración de gases y sustancias del fluido hidráulico hacia la superficie, impactos paisajísticos adversos y alteración de la biodiversidad (Albert, 2016).

Por otro lado, destaca la importancia de que en el ejercicio de las operaciones se apliquen las normas regulatorias en la materia sin ninguna omisión como lo viene haciendo La Unión

Europea en algunos países. Un ejemplo claro pasa en España y Reino Unido donde las empresas se les obliga a publicar los químicos aditivos que usan en el “fracking”. De esta manera se garantiza una práctica responsable del método de extracción (Asociación colombiana del Petróleo, 2018).

Por otro lado, y respondiendo el último interrogante que se planteaba arriba, por qué es importante que Colombia use el “fracking” con una regulación responsable, se puede disertar que es trascendental su aplicación, toda vez que el país necesita aumentar sus reservas para así asegurar la autosuficiencia energética, sin que le cueste la conservación en la salud de sus ciudadanos, el medio ambiente y el agua. En ese sentido, no es un acto caprichoso el uso de esta metodología extractiva, sino una necesidad esencial para ser competitivos mundialmente en el negocio petrolero, pero, además, garantizar recursos energéticos a la nación colombiana sin necesidad de que se traiga este insumo de otros países en alta escala.

Sin embargo, como se ha venido insinuando desde el principio de este aparte, el uso del “fracking” como la práctica general del sector de los hidrocarburos debe estar enfocado en favorecer la sostenibilidad ambiental, social, económica y sanitaria de Colombia. Por ello, la salud de la población, y la garantía de un ambiente sano como lo prescribe el art. 79 constitucional se tiene que aplicar con seriedad y realidad, y no como mero discurso.

Hay que anotar que la presente propuesta de ley en los aspectos de regulación de la industria de hidrocarburo se alimenta de articulados propuestos por la iniciativa de algunos intelectuales, y en lo que concierne al “fracking” es una construcción con base a la experiencia revisada en países como España, Reino Unido y Estados Unidos, donde se buscará principalmente determinar cuáles deben ser las dosis permitidas para la concentración y exposición de radiactividad y metales pesados en la exploración y producción de yacimientos no convencionales de roca generadora.

2.1. Proyecto de Ley

“Por la cual se dictan disposiciones para reformar aspectos de la industria de los hidrocarburos y establecer dosis máximas permitidas de concentración y exposición de radiactividad y metales pesados en la exploración y producción de yacimientos no convencionales de roca generadora.”

El Congreso de Colombia

DECRETA:

CAPITULO I

TÍTULO I

OBJETO Y PRINCIPIOS DE LA LEY

Artículo 1. OBJETO DE LA LEY

1. La presente norma tiene por objeto la adopción de las normas orgánicas en materia de hidrocarburos en aras de propender una política responsable, transparente y democrática, en el sector hidrocarburífero nacional en asuntos de exploración, explotación y producción.

2. Establecer criterios económicos, políticos, ambientales y sociales para el eco-desarrollo sustentable de la industria y su entorno, satisfacer las necesidades vitales de la población para preservar su desarrollo humano, económico y social, preservar la cultura y el medio ambiente a las generaciones actuales y futuras.

3. Fijar criterios generales en el uso de proyectos de roca generadora en Colombia de manera que se garantice la conservación del medio ambiente, la protección a la salud de

trabajadores y población aledaña a los terrenos intervenidos por este método de extracción y sus afines.

4. Fijar un criterio institucional en el cual el Estado colombiano obligará de parte de los operadores privados y estatales el cumplimiento de las dosis máximas permitidas de concentración y exposición de radiactividad y metales pesados en la exploración y producción de yacimientos no convencionales de roca generadora.

Artículo 2°. Principios generales. Se adoptan como principios generales de carácter vinculante para el desarrollo de la industria de los hidrocarburos los siguientes:

1° Soberanía nacional y autosuficiencia energética. Se consolida la soberanía nacional sobre el dominio inminente y control sobre los recursos hidrocarburíferos del Estado en que se encuentren o cualquiera que sea su naturaleza, y en general, en todos los ramos de la industria de los hidrocarburos, en función de lo cual, se garantizará a corto, mediano y largo plazo la autosuficiencia en materia de hidrocarburos y el suministro a la población colombiana. Además, de vigilancia constante sobre el ejercicio del fracking.

2°. El Estado propietario de los hidrocarburos. El Estado es el propietario de los hidrocarburos y en tal sentido tiene sobre los mismos el uso, goce y disposición exclusivamente. En este sentido la propiedad de los mismos le es inembargable, imprescriptible e inalienable, en todo caso, la participación de los particulares en el negocio, se realizará a través de la prestación de servicios industriales. El Estado colombiano podrá permitir la participación de los particulares, de modo que, las empresas extranjeras deberán estar constituidas en el país bajo las pautas legales

nacionales y sus actividades reguladas por los reglamentos de la industria nacional sin excepciones.

3° La industria de los hidrocarburos en pro del desarrollo social y la vida digna de la nación. El Estado colombiano tomará el beneficio de la renta generada por la explotación, procesamiento, transporte, distribución y comercialización para fomentar el desarrollo humano, superar la pobreza extrema y estructural, cubrir las necesidades sociales insatisfechas y desarrollar los sectores industriales que aseguren la dignidad humana y el buen vivir, la salud y la protección medio ambiental.

4° Los hidrocarburos como fuente de desarrollo nacional. La explotación de los recursos hidrocarburíferos serán utilizado en gran parte para el desarrollo humano de la población, la investigación y superar los índices de pobreza. Además, intervenir el cuidado de las fuentes hídricas y la fauna silvestre de Colombia.

5° La industria de los hidrocarburos como factor de desarrollo humano. El Estado deberá garantizar la formación técnica y profesional de los trabajadores colombianos, para los trabajos de la industria, que garantice el trabajo a los habitantes donde se desarrollen los proyectos y dará prioridad a la vinculación de la mano de obra nacional en condiciones por lo menos igual a los extranjeros. Además, de propender por su salud de los mismos en el uso de proyectos de roca generadora, tanto en el manejo de maquinarias y químicos.

6° La salud humana, la conservación hidrográfica y medio ambiental como prioridad frente a ripsos extraídos mediante la perforación horizontal de rocas generadoras de hidrocarburos. Los yacimientos no convencionales en ningún momento pueden menoscabar la vida y la salud humana en los territorios en los que se ejecute, ni mucho menos poner en peligro o dañar fuentes de agua potable o apta al consumo humano, así mismo, tampoco podrá en peligro la

supervivencia de la flora, fauna y demás vida medio ambiental. Frente al conflicto de peligro comprobado o demostración de daños por causa de rípios extraídos mediante la perforación horizontal de rocas generadoras de hidrocarburos se suspenderá, terminará o prohibirá su ejecución hasta no demostrar de manera científica, técnica y verificable por el Estado y entidades ambientales organizadas la corrección del inconveniente. De ser un daño grave y demasiado evidente se terminará inmediatamente la ejecución del proyecto por medio del A.N.H. y el Ministerio de Minas y Energía.

7°. La industria de los hidrocarburos y la promoción de la paz y los derechos humanos. La explotación, procesamiento, distribución y comercialización de los hidrocarburos deberán en todo momento dar prioridad al respeto de los derechos humanos y promoción de la paz mediante el impulso y su respeto, la realización de inversiones que redunden en el buen vivir de la población.

8°. Valores en las dosis de materiales radiactivos máximos permitidos y metales pesados. Para la toma de estos valores máximos permitidos en proyectos de roca generadora se tendrá en cuenta valores establecidos en regulaciones gubernamentales de países pioneros en este tipo de proyectos, así como los valores en concentración de metales pesados establecidos por el APC.

TÍTULO II

CAMPO DE APLICACIÓN

Artículo 3.- Campo de aplicación. - La presente ley regula en materia de hidrocarburos en aras de propender una política responsable, transparente y democrática, en el sector hidrocarburífero nacional colombiano en asuntos de exploración, explotación y producción; también se tendrá en cuenta dosis máximas permitidas de concentración y exposición de

radiactividad y metales pesados en la exploración y producción de yacimientos no convencionales de roca generadora.

TÍTULO III

DISPOSICIONES GENERALES

Artículo 4. Trabajadores/as Colombianos/as. Los colombianos tendrán preferencia para ser empleados en todas las dependencias de las empresas de hidrocarburos y en las que con éstas contraten obras, bienes o servicios de la industria. A los trabajadores colombianos se aplicarán, por lo menos, las mismas garantías, condiciones y salarios de los trabajadores extranjeros de igual categoría.

CAPITULO IV

CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Artículo 5. Ciencia, Investigación y tecnología. El Estado vigilará que las empresas privadas y públicas, por separado o de manera mancomunada, desarrollen investigaciones que optimicen la exploración, producción, refinación de hidrocarburos. Además, de investigaciones relacionadas con optimizar los proyectos de roca generadora en Colombia, en pro de reducir efectos negativos en el medio ambiente y la salud humana

CAPÍTULO V

CONSERVACIÓN AMBIENTAL

Artículo 6.- Cláusulas ambientales. – Todo contrato de exploración o explotación de hidrocarburos y la aplicación del uso de proyectos de roca generadora debe contener la cláusula

de protección del medio ambiente y su incumplimiento será causal de terminación unilateral del contrato por parte del Estado. Los contenidos mínimos de esta cláusula deberán ser:

1. Convocar la participación de la comunidad de las áreas de desarrollo de los proyectos hidrocarburíferos y donde se vaya hacer uso de estos proyectos para informar sobre la ejecución de las medidas y planes preventivos y de mitigación y de recuperación ambiental.

2. Propender por la forma más adecuada e idónea de intervención para causar el menor daño posible al medio ambiente y los ecosistemas, la utilización de las tecnologías de punta más amigables con el medio ambiente.

3. Realizar las inversiones necesarias para la preservación de los ecosistemas y la mitigación de los impactos medioambientales y sociales en las diferentes etapas de la industria, que permitan la conservación del medio ambiente y garanticen a la población la continuidad y uso de los servicios eco-sistémicos.

4. Ejecutar previos estudios especializados, el grado de intervención a los ecosistemas, tanto en la etapa de exploración como en la de explotación en las áreas que se intervendrá ya sea a través de la metodología tradicional de extracción o por medio de yacimientos no convencionales.

CAPITULO VI

REGULACION FRENTE A RIPIOS EXTRAÍDOS MEDIANTE LA PERFORACIÓN HORIZONTAL DE ROCAS GENERADORAS DE HIDROCARBUROS EN EL TERRITORIO COLOMBIANO

Artículo 7. Las empresas e industrias del sector de hidrocarburos privadas o públicas pueden hacer uso de los proyectos de roca generadora, siempre y cuando lo realicen con garantías

de protección del medio ambiente y la salud de los trabajadores y pobladores del territorio donde se ejecutará.

El Estado colombiano será el garante de que el uso de la fracturación hidráulica en roca generadora se haga con responsabilidad y transparencia; además que se apliquen altos estándares de calidad.

Artículo 8. El valor máximo permitido para los trabajadores ocupacionales tendrá un límite de 2,5 (dos punto cinco) mrem/hora, este valor es tomado de regulaciones gubernamentales en países pioneros en los métodos de perforación en yacimientos no convencionales.

Artículo 9. Para el valor en concentración de metales pesados se deberá tener en cuenta los valores permitidos por la Agencia Presidencial de Cooperación Internacional donde si los valores de agua extraída superan dichos valores, debe manejarse con las disposiciones pactadas para el manejo de sólidos y desechos peligrosos

Artículo 10. La Agencia Nacional de Hidrocarburos (A.N.H.) a través de una investigación rigurosa, en un tipo racional, debe establecer una escala de valores de la máxima radioactividad permitida de la formación productora de hidrocarburo a consecuencia de la extracción de hidrocarburos no convencionales.

Antes de establecerse la escala de valores, la A.N.H. tendrá un cuerpo especializado por 5 miembros expertos permanentes en el campo hidrocarburífero, los cuales serán escogidos a través de concurso de mérito a través de la Comisión Nacional del Servicio Civil, que estarán haciendo seguimiento estricto en relación a la radioactividad emanada del terreno explorado o explotado.

La información relacionada con radioactividad las industrias tienen el deber de suministrarla a la A.N.H. La falta de cumplimiento de esta obligación es causal para terminar contrato de concesión.

Los miembros estarán en el cargo por un término de 20 años. Un año antes de cumplirse la fecha, será convocado nuevo concurso por medio de la CNSC.

Los expertos harán recomendaciones a la A.N.H. sobre asuntos relacionados con la radioactividad. Además de ello, estos miembros están facultados para denunciar actos antiéticos y delictivos de las industrias tanto estatales como particulares en relación a la práctica extractiva convencional y no convencional.

Los miembros expertos rendirán cuentas de su gestión ante el Congreso de la República en el momento en que se considere necesario. Sin embargo, estos llamados no deberán superar más de 3 en un mismo año. El congreso deberá motivar la causa específica del control.

La A.N.H. establecerá el reglamento bajo el cual deberán regirse los cinco miembros expertos y el monto de sus honorarios.

Luego de establecida la escala de valor por parte de la A.N.H. los miembros harán seguimiento de que la industria haga cumplimiento de la misma.

Artículo 11. Los rípios de perforación y agua de formación con valores altos en componentes radiactivos y metales pesados deben ser tratados con todas las medidas de seguridad pactadas en el manejo de sólidos y desechos peligrosos.

Artículo 12. Las industrias están obligadas a suministrar a la A.N.H. la información de las sustancias químicas aditivas usadas en sus maniobras extractivas. Además, de aquellas, divulgarlas por la página web u otro medio expedito al público en general.

Lo anterior, sin perjuicios de menoscabar del derecho de reserva, sin embargo, de estas sustancias tendrá conocimiento la A.N.H. sin derecho a divulgarlas. Pero de considerarlas

peligrosas, con base a verificación científica, para la salud humana y la conservación del medio ambiente puede prohibir su uso inmediato.

Artículo 13. Si las sustancias o componentes usado o encontrados en el terreno contienen altos niveles radiactivos, debe buscarse, por parte del operador, industria o empresa otra alternativa menos lesiva. La alternativa encontrada debe ser socializada previamente a la A.N.H.

Artículo 14. En el territorio, en que se compruebe que sufre afectaciones grave y constante sismicidad, contaminación hídrica, menoscabo al medio ambiente, afectaciones a la salud de los trabajadores y pobladores, la A.N.H. tiene la facultad de prohibir la continuación del uso de proyectos de roca generadora en cuyo territorio.

Artículo 15. Anualmente la ANH y el Ministerio de Minas y Energía divulgarán un informe exhaustivo del estado del uso de yacimientos no convencionales en Colombia ante el Senado de Colombia.

Artículo 16. La presente ley deroga todas aquellas disposiciones que le sean contrarias al momento de entrar en vigencia.

3. Método

3.1 Identificación de isótopos radioactivos

Dado que el objetivo del estudio es identificar y clasificar los casos de mayor concentración de isótopos radiactivos, considerando además que el tema tiene un sustento teórico suficiente. se procedió a realizar una investigación de tipo descriptivo para encontrar formaciones a nivel mundial donde se utilizará proyectos de roca generadora y además que tuvieran una concentración más alta de lo normal en radionucleidos e identificar cuáles de estos componentes tenían mayor presencia en estas formaciones.

3.2 Clasificación y riesgo de isotopos radioactivos

Primero, en este proceso se explicó cuáles son las consecuencias que tiene la exposición a grandes cantidades de radiactividad, tanto para las personas como para el medio ambiente, entendiendo el por qué se debe tener un mucho cuidado cuando estos componentes están presentes. Así mismo, para la clasificación de estos componentes se tuvo en cuenta dos conceptos principales los cuales son la dosis efectiva y la concentración de actividad, con la ayuda de estos conceptos se creó una tabla en la cual se obtendrían estos datos para cada uno de las formaciones estudiadas y finalmente determinar si se encontraban en un rango en el cual pudieran afectar a los trabajadores. Este rango se tendría en cuenta con regulaciones gubernamentales de los Estados Unidos y al final de todo, demostraría que ninguno de estos campos representa un riesgo para la salud de sus trabajadores ya que los valores obtenidos están muy por debajo de lo estipulado como riesgoso.

3.3 Creación de proyecto de ley

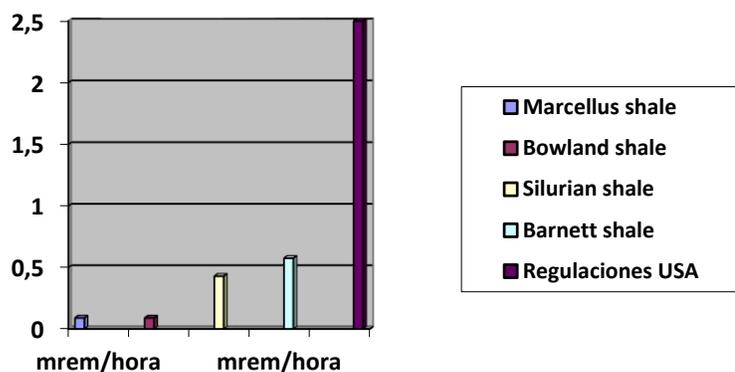
Para la creación de esta propuesta de proyecto de ley, primeramente se debió tomar nota de las diferentes legislaciones que rigen a la industria petrolera en Colombia, luego de esto, se tomó una postura no prohibicionista a la extracción de hidrocarburo por el método “*fracking*” para el desarrollo del proyecto de ley. Posteriormente a esto se toma en cuenta cuales son las consecuencias negativas y positivas de utilizar esta técnica, para esto se tomaron diferentes antecedentes del impacto que tuvo esta técnica en diferentes sectores, esto se hace principalmente para tener en cuenta que el uso de esta técnica debe ser totalmente transparente, responsable y democrático, ya que el mal uso de esta puede generar un impacto en la naturaleza y en comunidades aledañas a las zonas tan grandes que pueda llegar a ser irrecuperable. Así, luego de conocer toda la legislación que abarca a la industria petrolera y conocer los antecedentes de la técnica “*fracking*”, se realizó la propuesta de proyecto de ley a partir de esta información obtenida.

4. Resultados

Los resultados obtenidos por la investigación hecha en los capítulos 1 se encuentran agrupados en figura 7 de la siguiente manera

Figura 7

Comparativa de resultados



Nota. Grafico el cual permite una comparativa entre el valor permitido por las regulaciones gubernamentales y los valores obtenidos de las formaciones estudiadas.

Además, se encontró que los principales componentes encontrados en estas formaciones pertenecen al Ra-226 y al Ra-228 pertenecientes a las cadenas de desintegración del Uranio y el Torio respectivamente, donde de entre estos dos se encontró mayor presencia de Ra-226.

5. Discusión

Se puede observar en la figura 3 la diferencia ente el valor mínimo permitido por las regulaciones gubernamentales de los Estados Unidos y los valores de las formaciones estudiadas

son muy grandes, dando como resultado que estas formaciones no sean nocivas para los trabajadores de la zona, sin embargo, siempre se deben seguir las medidas pertinentes de seguridad para evitar cualquier riesgo a la salud tanto de los trabajadores como de las comunidades y zonas aledañas a esta.

Además, el capítulo 2 nos muestra que el “fracking” actualmente es una técnica muy debatida a nivel mundial, principalmente por los problemas que ha causado a lo largo de los años en los países donde fue utilizado. En Colombia, actualmente se aprecia este tipo de debates y discusiones, pero es importante tener en cuenta como se mencionó en el capítulo que la culpa de que las personas no tengan confianza a ésta, también se debe a cómo el Estado ha manejado el sector minero del país, donde siempre se le dio un trato especial a las empresas extranjeras, permitiéndoles hacer cosas que normalmente no hacen bien a la parte ambiental del país, es por eso que, para llevar a cabo esta técnica, es necesario una renovación o cambio de mucha de las leyes actuales del país que permita aplicar esta técnica de la manera más responsable y transparente, tomando medidas como en España y Reino Unido los cuales exigen que se muestre una tabla con los diferentes químicos y aditivos que se utilizaran, así con este tipo de regulaciones y mejorando la parte jurídica de la industria petrolera podría mejorar la confianza de las personas al fracking y así poder utilizarla de la manera más responsable.

6. Conclusiones

Se encontró que teniendo en cuenta los casos principales de radionucleidos en proyectos de roca generadora a nivel mundial estudiados en este trabajo de grado los componentes que se encuentran en mayor cantidad son el Ra-226 y el Ra-228 respectivamente los cuales son por gran diferencia los componentes con los que los trabajadores más pueden llegar a tener contacto, esto

debido principalmente a que se disuelven en el agua, permitiendo que se pueda mezclar con el agua de formación llegando hasta superficie de manera más sencilla.

Estos casos estudiados no representan ninguna amenaza a los trabajadores de la industria petrolera ya que teniendo en cuenta los valores recomendados por las regulaciones gubernamentales de los Estados Unidos, estos valores son mucho más pequeños que los valores permitidos, lo cual deja en evidencia que estas zonas a pesar de tener una radiactividad “alta” para este tipo de proyectos no generan ningún problema de salud a los trabajadores de esta zona, sin embargo, se deben seguir medidas HSE para mitigar cualquier riesgo a la salud.

Colombia debe a travesar por un mejoramiento de su normativa en el sector minero y petrolero antes de llevar acabo técnicas con un alto impacto ambiental, ya que mientras las leyes sigan favoreciendo a las empresas extranjeras, estas mismas solo buscaran su beneficio propio sin importarles el daño que puedan causar en el país.

El “fracking” es una técnica de extracción que ejerce un alto impacto en la parte ambiental y social, es por este motivo que de usarse en Colombia se debe hacer de la manera más transparente, responsable y democrática, si el Estado no puede garantizar estos tres factores el “fracking” no debería ser viable en el país, ya que solo generaría un daño irreparable en el medio ambiente y en comunidades aledañas a las zonas donde se utilizó esta técnica.

El “fracking”, no suele ser una técnica la cual tenga impacto directo en los trabajadores petroleros, debido a que las dosis de radiactividad que reciben son bastante bajar y no son continuas, por el contrario, el problema principal radica en comunidades cercanas a estas zonas, ya que si los desechos generados no son tratados de la manera correcta pueden llegar a causar problemas de salud a largo plazo en las personas, sean problemas cancerígenos, cardiacos o de cualquier otro tipo.

7. Recomendaciones

Se recomienda tomar antecedentes de casos posteriores a la aplicación del método “fracking” para ver las consecuencias en las zonas de implementación y si estas causaron algún daño ambiental o social en zonas aledañas.

Se recomienda hacer un proyecto de grado en el cual se hable completamente del “fracking” para de esta manera generar un proyecto de ley el cual tenga como finalidad regular el uso de esta técnica en el territorio colombiano

Tomar en cuenta si con la implementación del “fracking” las reservas de los países que lo han implementado han crecido exponencialmente y determinar si el riesgo que existe en su aplicación vale o no vale la pena desde el punto de vista económico y ambiental.

Referencias Bibliográficas

- Al Nchani, K. & Khan, F. (2020). Fundamentals of technologically enhanced naturally occurring nuclear radioactive materials in the oil and gas industry. *Nuclear Radioactive Materials in the Oil and Gas Industry* (pp. 51-90). Elseiver.
- Albert, L. (2016) El fracking y sus consecuencias en el ambiente.
- Almond, S., Clancy, A., Davies, R. & Worrall, F. (2014). *Environmental Science and Pollution Research*, 21(21), 16-24.
- Almond, S. (s.f). *How radioactive is fracking flowback water?*.
- APC. (2015). *Manual de gestión de residuos y desechos peligrosos*.
- Asociación Colombiana del Petróleo. (2018, 31 de junio). *Qué es el fracking y por qué genera tantas protestas*.
- Centenera, M. (2021). Vaca Muerta, la joya petrolera argentina que no termina de despegar. *El País*.
- Connor, N. (2020). *¿Qué es la vida media radiactiva?*.
- Constitución Política de Colombia [const]. Art. 79. Julio 7 de 1991 (Colombia).
- Constitución Política de Colombia [const]. Art. 332. Julio 7 de 1991 (Colombia).
- Constitución Política de Colombia [const]. Art. 360. Julio 7 de 1991 (Colombia).
- Cooperativa.cl. (2011). Conozca los niveles de radiación que pueden soportar los seres humanos. *Cooperativa.cl*.
- Diaz, S. (2014). *Riesgos asociados a la radioactividad natural en los proyectos de extracción de gas no convencional*.

- Echavez, R. (2021). *Evaluación del Óxido de Grafeno como Agente Secuestrante de Radionucleidos Naturales de las Series Uranio (238U) y Torio (232Th) en Aguas de Retorno Provenientes del Fracturamiento Hidráulico* [Tesis de maestría, Universidad Industrial Santander]. Archivo digital.
- Edmison, P., Keener, J., Buckwald, S., Sloan, B. & Terneus, J. (2011). Flow Back Water Treatment Using Swellable Organosilica Media. *Paper presented at the SPE Eastern Regional Meeting, Columbus, Ohio, USA.*
- EPA. (2021). *Efectos de la radiación sobre la salud.*
- Fisher, S. (1995). *Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM) in Produced Water and Scale from Texas On., Gas, and Geothermal Wells: Geographic, Geologic, and Geochemical Controls.* Bureau of Economic Geology & The University of Texas at Austin.
- Herrera, H. (2020, junio 30). La contaminación radiactiva del 'fracking'. *Las2Orillas.*
- IAEA. (2003). *Radiation Protection and the Management of Radioactive Waste in the Oil and Gas Industry.*
- L'annunziata. (2020). *Handbook of Radioactivity Analysis.* Elseiver.
- Ley 120 de 1919. (1919, 30 de diciembre). Congreso de la República.
- Ley 37 de 1931. (1931, 4 de Marzo). Congreso de la República.
- Ley 141 de 1994. Por la cual se crean el Fondo Nacional de Regalías, la Comisión Nacional de Regalías, se regula el derecho del Estado a percibir regalías por la explotación de recursos naturales no renovables, se establecen las reglas para su liquidación y distribución y se dictan otras disposiciones. Julio 30 de 1994. Do. N° 41.414.
- Ley 756 de 2002. Por la cual se modifica la Ley 141 de 1994, se establecen criterios de distribución y se dictan otras disposiciones. Julio 25 de 2002. Do. N° 44.878.

Ley 1530 de 2012. Por la cual se regula la organización y el funcionamiento del Sistema General de Regalías. Mayo 17 de 2012. Do. N°. 48.433

Li, L., Blomberg, A., Spengles, J., Coull, B., Schwartz, J. & Koutrakis, P. (2020). Unconventional oil and gas development and ambient particle radioactivity, *Nature Communications*, 11(5002).

Lopera, S. (1999). *La contratación petrolera colombiana en el contexto*. [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia sede Medellín]. Archivo Digital.

Marcellus Shale. (2011). Understanding Naturally Occurring Radioactive Material in the Marcellus Shale A discussion of the naturally occurring radioactive material resulting from natural gas drilling in the Marcellus Shale. *Marcellus Shale*, (4), 1-8.

Martine, E. (2021). NEUQUÉN. La basura del fracking en Vaca Muerta: un desastre ambiental exorbitante. *LA IZQUIERDA DIARIO*.

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2015). *Metales pesados*.

Nelson, A., Knight, A., Eitrheim, E. & Schultz, M. (2015). Monitoring radionuclides in subsurface drinking water sources near unconventional drilling operations: A pilot study. *Journal of Environmental Radioactivity*, 142, 24-28.

Rowan, E., Engle, M., Kirby, C. & Kraemer, T. (2011). *Radium Content of Oil- and Gas-Field Produced Waters in the Northern Appalachian Basin (USA): Summary and Discussion of Data*.

Smith, K., Blunt, D., Williams, G. & Tebes, C. (1996). *Radiological Dose Assessment Related to Management of Naturally Occurring Radioactive Materials Generated by the Petroleum Industry*". Argonne National Laboratory Environmental Assessment Division.

Planas, O. (2015, 2 de octubre). *¿Qué son los radionucleidos?*.

Fact Sheet (Fact Sheet). (1998). [Fact Sheet].