

**IMPACTO DE LA INDUSTRIA PETROLERA EN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS
DE BAJA SALINIDAD**

ANA ISABEL SALCEDO SOTELO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA DE FÍSICO-QUÍMICA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2013

**IMPACTO DE LA INDUSTRIA PETROLERA EN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS
DE BAJA SALINIDAD**

ANA ISABEL SALCEDO SOTELO

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO DE
PETRÓLEOS**

INGENIERO

OSCAR VANEGAS ANGARITA

DIRECTOR

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA DE FÍSICO-QUÍMICA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2013

DEDICATORIA

A Dios Jehová, quién supo guiarme por el buen camino, darme fuerzas para seguir adelante y no desmayar en los problemas que se presentaban, enseñándome a encarar las adversidades sin perder nunca la dignidad ni desfallecer en el intento.

A mi madre que con su apoyo incondicional, su paciencia y sus incontables esfuerzos, para que este sueño fuese cumplido, por su amor y compañía en mis tristezas y alegrías. Gracias.

A mi padre por los ejemplos de perseverancia y constancia que lo caracterizan, por su ayuda económica, por el valor mostrado para salir adelante y por su amor.

A mi hija Paula Andrea quien ha sido mi mayor motivación para nunca rendirme en los estudios y poder llegar a ser un ejemplo para ella.

A mi hermano Paúl porque sin su apoyo moral y económico no había sido posible esta meta, a mis hermanos Evelia y Luis por brindarme su ayuda.

A tí Fredy porque en los últimos 4 años me has demostrado que los ángeles sí existen si has estado conmigo incondicionalmente con tus palabras y tu sonrisa para no dejarme desfallecer.

ANA SALCEDO

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander por todo el conocimiento y la formación que me ha ofrecido.

Al Ing. **OSCAR VANEGAS ANGARITA** por su amistad, sus consejos, su colaboración y su apoyo durante estos largos años, ha sido no solo un profesor sino un excelente amigo, el cual ha hecho posible la elaboración de esta tesis, y gran parte de mi formación en la universidad; eres la incondicionalidad hecha hombre. Gracias.

A la Ing. **OLGA PATRICIA ORTIZ CANCINO** por su amable colaboración y su amistad brindada durante este tiempo, gracias por creer en mí y brindarme un apoyo cuando más lo necesité.

A mis compañeros que a lo largo de la carrera me han acompañado en los momentos buenos y difíciles de esta lucha diaria. Gracias a todos.

Gracias a los profesores de la carrera por su tiempo y dedicación.

“La dicha de la vida consiste en tener siempre algo que hacer, alguien a quien amar y alguna cosa que esperar”. Thomas Chalmers

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. GENERALIDADES.....	17
1.1 EL AGUA.....	17
1.1.1. Importancia del agua en la naturaleza y la vida.....	19
1.1.2. Ciclo del agua	19
1.2. HIDROGEOLOGÍA	21
1.2.1. La hidrogeología en el campo de las ciencias.....	22
1.3. AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	23
1.3.1. Zonas de saturación y aireación	24
1.3.2. Factores de movimientos de las aguas subterráneas	25
1.3.3. Aguas Subterráneas en el Mundo.....	28
1.4. ACUÍFERO.....	30
1.4.1. Tipos de Acuíferos	30
1.4.2. Propiedad de los Acuíferos	35
1.5. ORIGEN Y PROCEDENCIA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS....	37
1.6. ASPECTOS GEOLOGICOS DE FORMACIÓN DE FUENTES SUBTERRÁNEAS DE BAJA SALINIDAD	42
1.6.1. Geología.....	42
1.6.2. Exploración Geofísica.....	43
1.6.3. Gestión del agua subterránea	45
2. DESCRIPCIÓN DE LOS POSIBLES IMPACTOS EN LAS AGUA SUBTERRÁNEAS DE BAJA SALINIDAD CAUSADOS POR LAS ACTIVIDADES DE LA INDUSTRIA PETROLERA	67
2.1 Sísmica	70

2.2 Perforación	76
2.3 Producción	79
2.4 Transporte	103
2.5 EJEMPLOS DE IMPACTOS EN AGUAS SUBTERRÁNEAS A NIVEL MUNDIAL	105
2.5.1 Indonesia	105
2.5.2 Colombia	106
2.5.3 Estados Unidos	109
2.5.4 Ecuador	111
3. NUEVAS ALTERNATIVAS PARA MITIGAR IMPACTOS DE LA INDUSTRIA PETROLERA EN LAS AGUAS DE BAJA SALINIDAD.	113
3.1. Sísmica	114
3.2. Perforación	122
3.3 Producción	127
3.4 Transporte	131
4. CONCLUSIONES	135
5. RECOMENDACIONES	137
BIBLIOGRAFIA	139

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Cantidad y distribución estimada del agua en el mundo.....	17
Figura 2. Ciclo del agua	20
Figura 3. Zona de saturación y zona de aireación	25
Figura 4. Tipos de acuíferos según su comportamiento hidráulico.....	30
Figura 5. Esquema de un acuífero libre	32
Figura 6. Sistema hidrogeológico de un acuífero semiconfinado.....	34
Figura 7. Mapa de distribución de las Aguas Subterráneas de la tierra.....	41
Figura 8. Diagrama de flujo metodológico de exploración hidrogeológica regional.....	43
Figura 9. Áreas de recarga y descarga de aguas subterráneas	45
Figura 10. Corrientes influentes y corrientes efluentes.....	54
Figura 11. Etapas de un ciclo de vida de un proyecto petrolero.....	67
Figura 12. Malla Sísmica 3D.....	72
Figura 13. Representación interna de un pozo con carga explosiva en su interior.....	73
Figura 14. Radios de perforación antes y después de la detonación.....	74
Figura 15. Mapa de cuerpos de agua presentes en la zona, proyecto Niscota.	75
Figura 16. Cementación primaria de un pozo.....	77
Figura 17. Parámetros que afectan el sellado durante la cementación.....	78
Figura 18. Miembro de la comunidad, con evidencias a causa del impacto ambiental.....	81
Figura 19. Modelo de trampa geológica.....	83
Figura 20. Modelos de recipientes cerrados de los entornos hidrostático (A) e hidrodinámico, (B), mostrando gradiente de presión, y carga hidráulica, y los efectos sobre la acumulación de petróleo y gas en condiciones hidrostática e hidrodinámica D.....	84

Figura 21. Modelos de dirección de flujo. Las posibles rutas del hidrodinamismo serían las unidades del Paleozoico, el cual se pone en contacto con las unidades de la Formación Carbonera, el León Shale y Guayabo.	86
Figura 22. Río Cusiana antes de la industria petrolera.	88
Figura 23. Río Cusiana hoy en invierno.	89
Figura 24. Río Cusiana hoy en verano.	89
Figura 25. Río Cusiana hoy en verano después de una fuerte lluvia.	90
Figura 26. Río Cusiana hoy en verano.	91
Figura 27. Esquema de la hipotética contaminación del acuífero debido a daño en la cementación del pozo por sobrepresión.	93
Figura 28. Esquema de la hipotética contaminación del acuífero debido a fracturas generadas en el overburden por el fracturamiento hidráulico.	94
Figura 29. Esquema de la hipotética contaminación del acuífero debido a fracturas generadas en el overburden por el fracturamiento hidráulico que interceptan un yacimiento convencional de aceite/gas.	95
Figura 30. Esquema de la hipotética contaminación del acuífero debido a fracturas generadas en el overburden por el fracturamiento hidráulico que interceptan fallas selladas o inactivas.	96
Figura 31. Esquema de la hipotética contaminación del acuífero debido a fracturas generadas en el overburden por el fracturamiento hidráulico, las cuales interceptan otros pozos convencionales de aceite/gas deteriorados y comunican después al acuífero.	97
Figura 32. Esquema de la hipotética contaminación del acuífero debido a fracturas generadas en el overburden por el fracturamiento, las cuales interceptan otros pozos convencionales de aceite/gas que son incorrectamente cerrados y comunica después al acuífero.	98
Figura 33. Reinyección de aguas residuales.	100
Figura 34. Contaminación de las aguas subterráneas.	102
Figura 35. Construcción de zanjas para la instalación de los oleoductos. ...	103

Figura 36. Bosques Húmedos de Sakai.....	106
Figura 37. Consecuencias en la Laguna La Lipa.....	107
Figura 38. Contaminación en EUA por el Shale gas.....	110
Figura 39. Impactos en Ecuador Lago Agrio.....	112
Figura 40. Tecnología OFT.....	115
Figura 41. Mapa de análisis espectral en Venezuela.....	117
Figura 42. Mapa de las zonas geo eléctricamente anómalas tipo “depósitos de hidrocarburos” en el área de interés Llanos Orientales Colombia.	118
Figura 43. Mapa de las zonas geo eléctricamente anómalas tipo “depósitos de hidrocarburos” en el área de interés Magdalena Medio.....	119
Figura 44. Corte transversal a lo largo del yacimiento. Bloque licenciado en Colombia, región los Llanos Orientales, según datos obtenidos con SVER.	120
Figura 45. Camión Vibroseis.....	121
Figura 46. Manejo de tecnología de Vibroseis.....	121
Figura 47. Perforación Under Balance.....	125
Figura 48. Plataforma de perforación de tubería en espiral híbrida colled tubing.....	127
Figura 49. Sistema de operación que se realiza al agua producida.....	128
Figura 50. Oleoductos en Estados Unidos.....	131
Figura 51. Construcción de oleoductos en Estados Unidos y Canadá.	132

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Algunos tipos de formaciones hidrogeológicas y rangos característicos de porosidad y permeabilidad de las mismas.	25
Tabla 2. Porcentaje de distribución del agua lluvia según el terreno.	60
Tabla 3. Rocas representativas de sedimentos acuíferos.	63
Tabla 4. Ventajas y desventajas de la perforación Under Balance.	125

RESUMEN

TÍTULO: “IMPACTO DE LA INDUSTRIA PETROLERA EN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DE BAJA SALINIDAD”.

AUTOR: ANA ISABEL SALCEDO SOTELO**.

PALABRAS CLAVES: Aguas subterráneas, Medio ambiente, Impactos industria petrolera, Nuevas tecnologías.

DESCRIPCIÓN:

La industria petrolera cada día está generando más y más controversia en todos los ámbitos ambientales pues se considera una de las industrias más contaminantes del planeta, sin embargo este panorama puede cambiar si las leyes de cada país elevan sus restricciones y aumentan las penas condenatorias.

El objetivo del presente proyecto es demostrar que ya existen tecnologías que pueden mejorar dichos problemas contaminantes de la industria y que, aunque son un poco costosas para las compañías, son amigables y terminan siendo la mejor solución para todos. Además, se puede mencionar la importancia de cuidar nuestras aguas subterráneas, puesto que se sigue con el mal manejo de las aguas residuales, se terminará por contaminarlas en su totalidad; y en un futuro no muy lejano, no habrá agua potable en los ríos, lagunas y quebradas.

Además, se busca que la Escuela de Petróleos incluya en la Reforma Académica algunas asignaturas que tenga que ver con la preservación del medio ambiente y de los recursos hídricos; y así que desde la academia los futuros ingenieros tomen conciencia de la importancia de preservar el medio que los rodea.

El proyecto se fundamenta en la necesidad de buscar soluciones alternas a problemas relacionados con todas las etapas del desarrollo de un campo petrolero, evitando la contaminación de aguas subterráneas.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingeniería Físico-Química, Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Oscar Vanegas Angarita, Ingeniero de Petróleos.

SUMMARY

TITLE: "IMPACT OF THE OIL INDUSTRY IN LOW GROUNDWATER SALINITY".

AUTHOR: ANA ISABEL SALCEDO SOTELO**.

KEYWORDS: Groundwater environmental impacts oil industry, new technologies.

DESCRIPTION:

The oil industry is generating every day more and more controversy in all environmental areas it is considered one of the most polluting industries in the world however this situation may change if the laws of each country raise its restrictions and penalties increase convictions.

The objective of this project is to demonstrate that existing technologies that can improve these problems pollutants from industry and although a little expensive for companies, they are friendly and end up being the best solution for everyone. We may also mention the importance of protecting our groundwater and that if we continue with the mismanagement of waste will end up contaminating treatments in its entirety and in the not too distant future we will not have to replace the water of rivers.

Besides making our school take up the matter and Academic Reform that is being applied to Petroleum Engineering urgently include a subject that has to do with the preservation of the environment and water resources, and so from the academy future engineers aware of the importance of preserving the environment around them.

The project is based on the need to seek alternative solutions to problems related to all stages of development of an oil field; avoiding groundwater contamination.

* Work degree

** Physicochemical Faculty of Engineering. School of Petroleum Engineering. Director: Oscar Vanegas Angarita. Petroleum Engineer.

INTRODUCCIÓN

Las aguas subterráneas son un factor determinante, incluso en numerosos casos vital para el suministro de agua potable de muchas áreas urbanas y rurales tanto a nivel nacional como global. Sin embargo, profesionales poco informados tienden a ver el flujo de aguas subterráneas como algo que se asemeja a lo místico o metafísico. Por lo tanto existe dificultad acerca de la percepción de la contaminación de aguas subterráneas y una ignorancia o complacencia sobre los riesgos de contaminación, incluso entre administradores de recursos de agua y suelos. Debido a lo anterior, no se ha prestado mucha atención a la prevención de la contaminación de estas mismas fuentes de agua subterráneas, y aún menos a la protección de los acuíferos en su conjunto.

Actualmente, los esfuerzos por encontrar nuevas reservas de hidrocarburos y optimizar el recobro de las reservas existentes, se encuentra en uno de sus niveles históricos más altos. Dicha situación ha hecho que la actividad de las empresas tanto a nivel nacional como global, atraviesen uno de los momentos de mayor actividad. Este panorama plantea la necesidad de evaluar con practicidad, claridad y conocimiento, los efectos causados por las actividades de las Industrias Petroleras y proponer soluciones ajustadas a la normatividad ambiental existente y a los avances tecnológicos disponibles.

La mala calidad del agua subterránea puede ser debida a causas naturales o a la actividad humana. En general, al hablar de contaminación nos referimos a esta última, por ejemplo, un vertido industrial. En muchas ocasiones, la distinción no es fácil, pues una actividad humana no contaminante (en general, los bombeos) altera un equilibrio previo, provocando el deterioro de la calidad del agua subterránea.

El gran impacto ambiental que puede causar la Industria Petrolera sobre las aguas subterráneas por no implementar planes de manejo adecuado es realmente considerable; los daños ambientales no solo afectan significativamente al entorno natural, sino que también las grandes industrias se ven obligadas a reducir su economía debido a las demandas ejecutadas por las entidades ambientales encargadas de llevar control sobre este tipo de situaciones; hay que tener en cuenta que una crisis ambiental podría reducir la producción en las Industrias Petroleras y su credibilidad bajaría de tal forma que no podrían estar a la vanguardia en un mercado que es altamente competitivo.

La implementación de nuevos procedimientos y tecnologías ofrecen una mejor relación entre las Industrias Petroleras y el Medio Ambiente. De acuerdo a lo anterior; mediante un estado del arte, en este trabajo podremos ver a profundidad, los impactos ambientales causados por un mal manejo de las Industrias Petroleras sobre la aguas subterráneas y como se pueden mejorar significativamente, teniendo como base esta investigación, evitando así, percances que puedan afectar la economía y la competitividad en las Industrias del Petróleo tanto a nivel nacional como global.

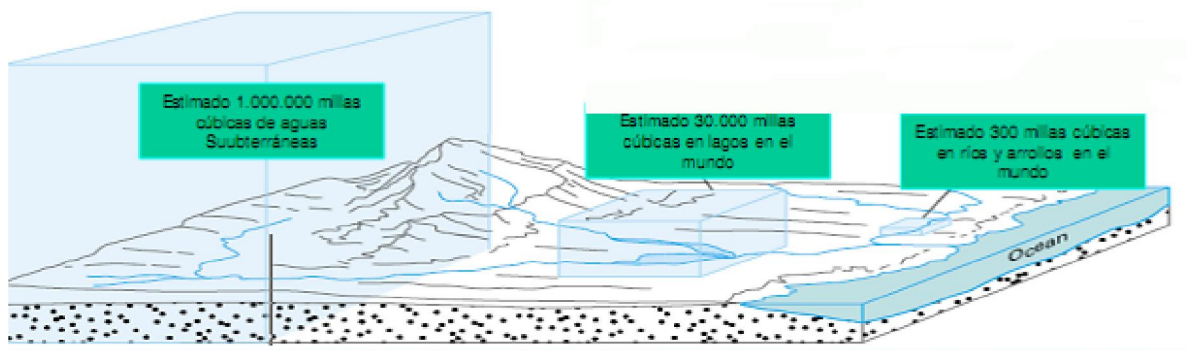
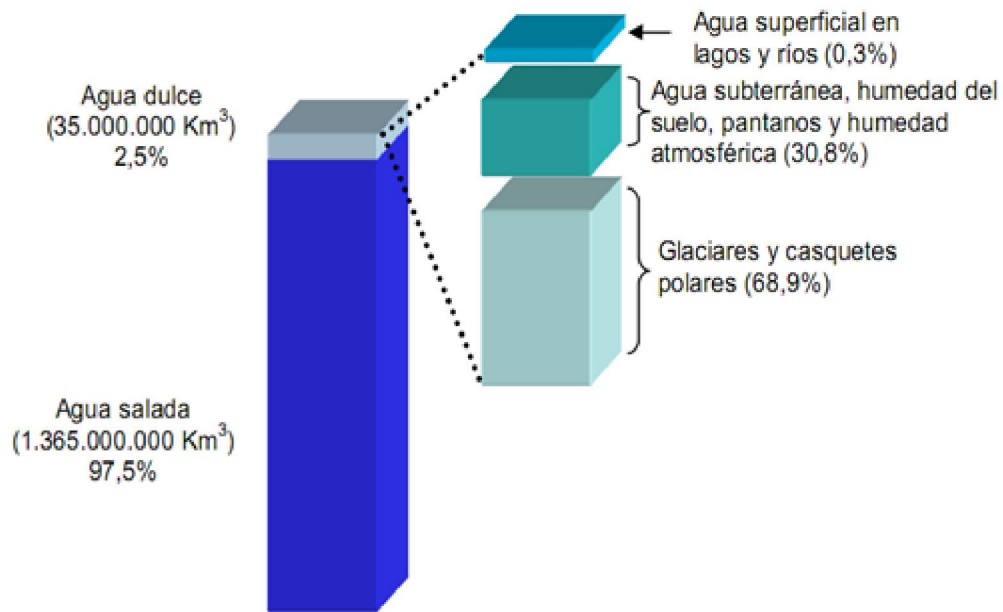
1. GENERALIDADES

1.1 EL AGUA

El agua es una sustancia cuya molécula está formada por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno (H₂O). Es esencial para la supervivencia de todas las formas conocidas de vida. El termino agua, generalmente se refiere a la sustancia en su estado líquido, pero la misma puede hallarse en su forma sólida llamada hielo y en forma gaseosa denominada vapor.

El agua cubre el 71% de la superficie de la corteza terrestre. Se localiza principalmente en los océanos donde se concentra el 97,5% del agua total, el 2.5% restante se reparte en glaciares y casquetes polares 68.9%, agua subterránea, humedad del suelo, pantanos y humedad atmosférica 30.8% y tan solo el 0.3% está en agua superficial comprendida entre lagos, humedad del suelo, atmósfera, embalses, ríos y seres vivos.

Figura 1. Cantidad y distribución estimada del agua en el mundo



Fuente: http://www.whymap.org/whymap/EN/Home/gw_world_g.html?nn=157

7094.

1.1.1. Importancia del agua en la naturaleza y la vida. La vida en la Tierra ha dependido siempre del agua y de los grupos zoológicos que han evolucionado hacia una existencia terrestre, siguen manteniendo dentro de ellos su propio medio acuático, encerrado, y protegido contra la evaporación excesiva. Las investigaciones han revelado que la vida se originó en el agua. El agua constituye más del 80% del cuerpo de la mayoría de los organismos, e interviene en la mayor parte de los procesos metabólicos que se realizan en los seres vivos. Desempeña de forma especial un importante papel en la fotosíntesis de las plantas y sirve de hábitat a una gran parte de los organismos.

El agua dulce es un recurso renovable pero la disponibilidad de agua fresca limpia, no contaminada, está disminuyendo de manera constante. En muchas partes del mundo, la demanda de agua ya excede el abastecimiento; a medida que aumenta la población mundial, así también aumenta la demanda de agua limpia.

Dada la importancia del agua para la vida de todos los seres vivos, y debido al aumento de las necesidades de ella por el continuo desarrollo de la humanidad, el hombre está en la obligación de proteger estos recursos y evitar toda influencia nociva sobre las fuentes del preciado líquido.

1.1.2. Ciclo del agua. El agua existe en la Tierra en tres estados: Sólido (hielo, nieve), líquido y gas (vapor de agua), océanos, ríos, nubes y lluvia están en constante cambio. El agua de la superficie se evapora, el agua de las nubes precipita, la lluvia se filtra por la tierra, etc. Sin embargo, la cantidad total de agua en el planeta no cambia. La circulación y conservación de agua en la Tierra se llama ciclo hidrológico, o ciclo del agua¹

¹ Ciclo del agua, Iñaki Echebarría Aranzábal, Enciclopedia Británica – 1985.

Cuando se formó, hace aproximadamente cuatro mil quinientos millones de años, la Tierra ya tenía en su interior vapor de agua. En un principio, era una enorme bola en constante fusión con cientos de volcanes activos en su superficie.

El magma, cargado de gases con vapor de agua, emergió a la superficie gracias a las constantes erupciones. Luego la Tierra se enfrió, el vapor de agua se condensó y cayó nuevamente al suelo en forma de lluvia. Ver figura 2.

Figura 2. Ciclo del agua



Fuente: U.S. Department of the interior <http://ga.water.usgs.gov/edu/watercycle.html>

El ciclo hidrológico comienza con la evaporación del agua desde la superficie del océano. A medida que se eleva, el aire humedecido se enfría y el vapor se transforma en agua: es la condensación. Las gotas se juntan y forman una nube. Luego, caen por su propio peso: es la precipitación. Si en la

atmósfera hace mucho frío, el agua cae como nieve o granizo. Si es más cálida, caerán gotas de lluvia.

Una parte del agua que llega a la tierra será aprovechada por los seres vivos; otra escurrirá por el terreno hasta llegar a un río, un lago o el océano. A este fenómeno se le conoce como escorrentía. Otro poco del agua se filtrará a través del suelo, formando capas de agua subterránea, este proceso es la percolación. Más tarde o más temprano, toda esta agua volverá nuevamente a la atmósfera, debido principalmente a la evaporación.

Al evaporarse, el agua deja atrás todos los elementos que la contaminan o la hacen no apta para beber (sales minerales, químicos, desechos). Por eso el ciclo del agua nos entrega un elemento puro. Pero hay otro proceso que también purifica el agua, y es parte del ciclo: la transpiración de las plantas.

Las raíces de las plantas absorben el agua, la cual se desplaza hacia arriba a través de los tallos o troncos, movilizándola consigo a los elementos que necesita la planta para nutrirse. Al llegar a las hojas y flores, se evapora hacia el aire en forma de vapor de agua. Este fenómeno es la transpiración.

1.2. HIDROGEOLOGÍA

La hidrogeología es una rama de las ciencias geológicas (dentro de la Geodinámica Externa), que estudia las aguas subterráneas en lo relacionado con su circulación, sus condicionamientos geológicos y su captación, así su definición dice:

“La hidrogeología es la ciencia que estudia el origen y la formación de las aguas subterráneas, las formas de yacimiento, su difusión, movimiento, régimen y reservas, su interacción con los suelos y rocas, su estado (líquido, sólido y gaseoso) y propiedades (físicas, químicas, bacteriológicas y

radiactivas); así como las condiciones que determinan las medidas de su aprovechamiento, regulación y evacuación”.²

1.2.1. La hidrogeología en el campo de las ciencias. La hidrogeología es una rama del conocimiento que se basa y utiliza el concurso de muchas y muy variadas disciplinas, una de las principales es la geología ya que son precisamente las formaciones geológicas las que constituyen el medio donde se almacena y se mueve el agua subterránea. Sin un conocimiento básico de ciertos aspectos de la geología es imposible un estudio de los recursos en aguas subterráneas y mucho menos su explotación racional.

Otras disciplinas son:

- La hidroquímica que permite el conocimiento de las características químicas del agua que va a ser explotada, aspecto éste esencial tanto desde el punto de vista técnico como en lo que se relaciona con la utilización.
- La mecánica de los fluidos para poder estudiar las leyes que rigen el movimiento de un fluido en un medio poroso.
- La hidrología de superficie ya que los recursos superficiales están íntimamente relacionados con las aguas subterráneas.
- La climatología para evaluar la precipitación y la evapotranspiración, factores esenciales desde el punto de vista cuantitativo, en particular en lo relativo a la recarga de los acuíferos.

² Fetter, C.W. (2001).-Applied Hydrogeology. Prentice-Hall, 4ª ed.

- La estadística, en particular con el desarrollo de nuevos métodos basados en variables aleatorias que permiten estimar los recursos en aguas subterráneas de una región dada.

1.3. AGUAS SUBTERRÁNEAS

El agua subterránea es la porción de agua que se encuentra por debajo de la superficie terrestre y que puede ser colectada por medio de pozos, túneles, galerías de drenaje o que fluirán naturalmente a la superficie. (Hidrología y procesos hidráulicos 2011).

Es económicamente explotable mediante pozos de captación por bombeo (pozo artesiano) o a presión natural (surgencia). La alimentación es por precipitaciones, de ríos, lagos, zonas de recarga, manantiales etc.

Representa una fracción importante de la masa de agua presente en cada momento en los continentes, mucho más importante que la masa de agua retenida en lagos o circulante, y aunque menor al de los mayores glaciares, las masas más extensas pueden alcanzar millones de km. El agua del subsuelo es un recurso importante, por su sensibilidad a la contaminación y a la sobre explotación.³

Los sistemas de agua subterránea proporcionan globalmente del 25 al 40 por ciento del agua potable en todo el mundo.

³ Hidráulica de aguas subterráneas María Victoria Vélez Otálvaro, 2ª edición 1999.

El agua subterránea representa un enorme recurso que se puede administrar solamente mediante el entendimiento de los diferentes tipos de acuíferos y sus índices de recuperación o recarga.

1.3.1. Zonas de saturación y aireación. El agua subsuperficial se divide verticalmente en dos zonas, dependiendo de la proporción de los poros ocupados por agua: la zona de "saturación" y la zona de "aireación". Ver figura 3.

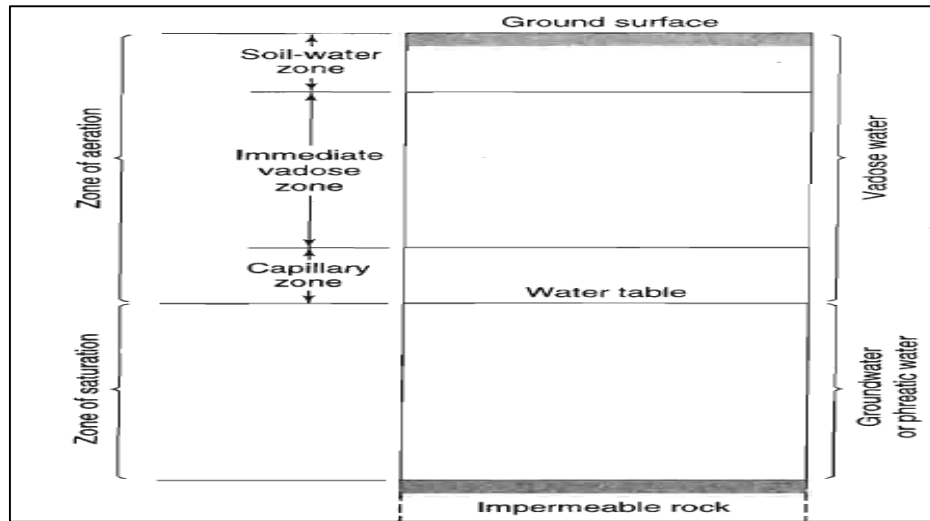
La zona comprendida desde la línea freática hasta la superficie del suelo se denomina zona de "aireación", en esta zona los poros contienen gas y agua. La misma se subdivide en zonas (Bear, 1967):

- La zona "capilar", donde asciende el agua de la capa freática por capilaridad.
- La zona "vadosa" o intermedia, donde el agua se encuentra inmóvil, gobernada por fuerzas higroscópicas y capilares.
- La zona "agua suelo", es adyacente a la superficie del suelo y se extiende por debajo del mismo a través de la zona de las raíces vegetales. Esta zona es afectada por las condiciones de la superficie del suelo, fluctuaciones estacionales y diurnas, irrigación, precipitación, humedad y temperatura del aire, etc.

La zona que se encuentra debajo de la zona de aireación, debajo de la superficie freática hasta el manto impermeable, se denomina zona de "saturación", en esta zona los poros se encuentran completamente llenos de agua.

En los casos donde la zona freática se encuentra a escasa profundidad, la zona vadosa desaparece, puesto que el agua asciende por capilaridad hasta la superficie.

Figura 3. Zona de saturación y zona de aireación



Fuente: Groundwater hidrology, 2005.

1.3.2. Factores de movimientos de las aguas subterráneas. Los factores que regulan el movimiento en las aguas subterráneas son porosidad, permeabilidad y filtración, y estos dependen del tipo de roca o material por el cual se filtra el agua, como lo indica la tabla 1.

Tabla 1. Algunos tipos de formaciones hidrogeológicas y rangos característicos de porosidad y permeabilidad de las mismas.

Tipo de formación hidrogeológica	Ejemplos	Rangos de permeabilidad	Rangos de porosidad
Acuífero	<ul style="list-style-type: none"> Formaciones aluviales con gravas y arena. Formaciones calizas karstificadas. 	1 – 1000 md	10% - 30%

Acuitado	<ul style="list-style-type: none"> • Formaciones aluviales con arenas muy finas, limo y arcillas. • Formaciones margosas 	0.1 – 0.001 md	20% - 40%
Acuicludo	<ul style="list-style-type: none"> • Formaciones arcillosas. 	$10^{-4} - 10^{-7}$ md	>40%
Acuifugo	<ul style="list-style-type: none"> • Rocas ígneas y metamórficas “sanas”. • Formaciones carbonatadas sin fisuración ni karstificación. 	$< 10^{-6}$ md	<0.1%

Fuente: Molinero. J., 2011, modificado de UK-Groundwater Forum: “Groundwater, our hidden asset”.BGS.

1.3.2.1. Porosidad. La porosidad de los materiales rocosos es el porcentaje de huecos o espacios vacíos en el suelo o roca; (Fetter., W.2001) y es definida matemáticamente por la ecuación (1).

$$n=100Vv/V.$$

(Ecuación 1)

Donde:

n = la porosidad (porcentaje)

Vv = el volumen de espacios vacíos por unidad de volumen (L³, cm³ o m³)

V = el volumen total de roca junto con los espacios porosos.

1.3.2.2. Conductividad hidráulica (Permeabilidad). La capacidad que tiene un material de permitir que se establezca un flujo de aguas subterráneas -o cualquier fluido- a través suyo. Y la permeabilidad es debida a la porosidad primaria y secundaria de una roca y dependerá de la porosidad y de la conexión entre los poros e intersticios, del tamaño y forma de los poros y de la cantidad de poros (Fetter, C.W.) En otras palabras la permeabilidad depende no sólo de la porosidad de la roca, sino del tamaño, cantidad y forma de los poros.

1.3.2.3. Filtración. La filtración varía mucho, según la naturaleza del suelo, la vegetación y la estación. Un suelo arenoso y desnudo puede absorber del 30 al 60 % del agua lluvia caída. El mismo terreno arenoso recubierto de vegetación, sólo deja filtrar un 10 %, exclusivamente durante el otoño y el invierno.

Un suelo calizo con muchas fisuras y desnudo es muy permeable; absorbe directamente el agua de escorrentía y el coeficiente de filtración oscila entre el 33 y el 90 %, con una media del 70 %. Un terreno arcilloso por el contrario, es impermeable y no deja que el agua filtre. Además de los poros están las fisuras, diaclasas, huecos, que representan posibilidades de filtración rápida. Las rocas consideradas muy permeables son las calizas. Las rocas que simplemente son porosas y permeables podrán producir mantos de agua subterránea. Las rocas con fisuras y muy permeables podrán dar lugar a corrientes de agua subterráneas⁴.

⁴Aguas subterráneas captación y aprovechamiento, J. Martínez; P. Ruano. 1998

1.3.2.4. Transmisividad. Se define la transmisividad (T) como el caudal de agua, a la viscosidad que esta se encuentra, que pasa por unidad de ancho del acuífero bajo un gradiente hidráulico unitario. En formulas:

$$T = \frac{K}{b}$$

(Ecuación 2)

Donde:

K = es la conductividad hidráulica

b = es el espesor del acuífero.

1.3.3. Aguas Subterráneas en el Mundo. En los últimos años, los estudios de aguas subterráneas se han llevado a cabo en todas las cuencas del mundo. De estos estudios, destacan el trabajo de Hitchon y Friedman (1969) y Hitchon et al. (1971), donde se describen algunos factores que afectan la composición química de las aguas involucrando el estudio de isótopos estables de hidrógeno D (^2H) y oxígeno (^{18}O). Kharaka et al. (1973), caracterizan químicamente las aguas de formación, el flujo de agua y de solutos, a través de membranas geológicas. Posteriormente, Kharaka et al. (1987), describen geoquímicamente a las salmueras ricas en metales de la parte Central de la Cuenca Salina de Mississippi en los Estados Unidos.

Egeberg y Aagaard (1989) y Connolly et al. (1990), interpretan el origen y evolución de las aguas subterráneas, en función del análisis de compuestos inorgánicos de la Cuenca de Alberta al Oeste de Canadá y en la Plataforma Noruega respectivamente. Walter et al. (1990), investigan la relación en el sistema Br-Cl-Na, como herramienta para determinar la evolución de las aguas. Stueber et al. (1992), estudian las aguas subterráneas de yacimientos mississippiicos-pensilvánicos en la Cuenca de Illinois, a través de la caracterización química e isotópica.

De los trabajos más importantes en salmueras se considera el de Fontes y Matray (1993a, b), donde se hace una excelente descripción geoquímica del origen de las aguas de la Cuenca de París. Hanor (1994), publicó un trabajo acerca del origen de fluidos salinos en cuencas sedimentarias, basado en las relaciones entre algunos cationes. Davisson y Criss (1996), proponen el cálculo del exceso de calcio y el déficit de sodio, para determinar procesos de interacción con la roca.

Buzek y Michalíček (1996), estudian los solutos (y relaciones entre ellos) de las aguas subterráneas de la parte Sureste del Macizo Bohemian y la Cuenca de Viena, para determinar su efecto en la diagénesis de rocas, a través de la descripción de procesos de dilución y el comportamiento de algunos elementos. Edmunds (1996) hace un estudio detallado acerca del comportamiento conservativo del Br, para evaluar los efectos de dilución y evaporación de las salmueras. Worden (1996) evalúa las relaciones entre halógenos para determinar tendencias de evolución de las aguas en cuencas sedimentarias.

Bazin et al. (1997a, b), presentan los datos químicos de las aguas subterráneas de la Cuenca de Mahakam (Kalimantan, Indonesia) y su relación con la diagénesis de yacimientos petroleros a partir de la reconstrucción de paleo-aguas. Chi y Savard (1997) dilucidan los efectos de la evaporación de agua marina y la disolución de halita, en función de las relaciones de halógenos. Cai et al. (2001), estiman el origen y migración de las aguas, y su relación con la migración de petróleo a partir del análisis de iones mayores, isótopos ambientales ($\delta^{87}\text{Sr}$, δD y $\delta^{18}\text{O}$) y relaciones entre halógenos. Respecto al origen y caracterización de solutos de aguas subterráneas destacan los trabajos de Lampen y Rostron (2000), Palandri y Reed (2000), Vengosh et al. (2000), Michael et al. (2003), Smith y Compton (2003) y Tijani (2004).

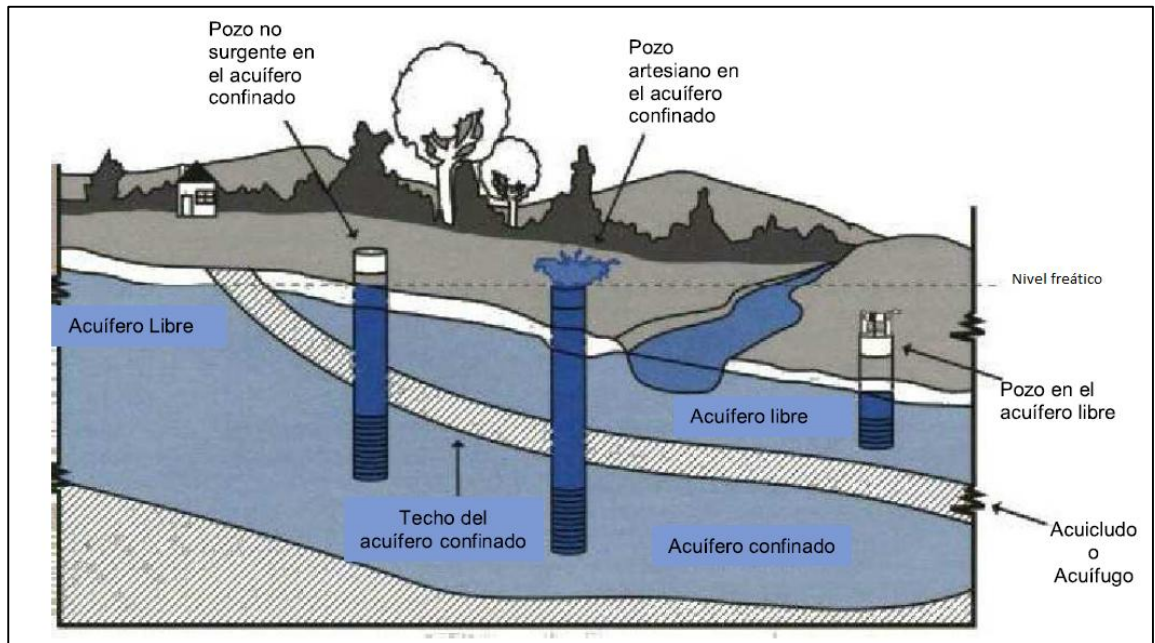
1.4. ACUÍFERO

Un acuífero es una formación suficientemente permeable para transmitir agua en cantidades. Los acuíferos más comunes son aquellos de material no consolidado como arenas o gravas. Estos se encuentran en valles aluvionales, dunas o depósitos glaciales.

1.4.1. Tipos de Acuíferos. Atendiendo al comportamiento hidráulico de las formaciones geológicas, así como a su posición estructural en el terreno, se distinguen tres tipos principales de acuíferos (Molinero., J. 2011). Ver figura 4.

- Acuíferos no confinados o libres.
- Acuíferos confinados.
- Acuíferos semiconfinados.

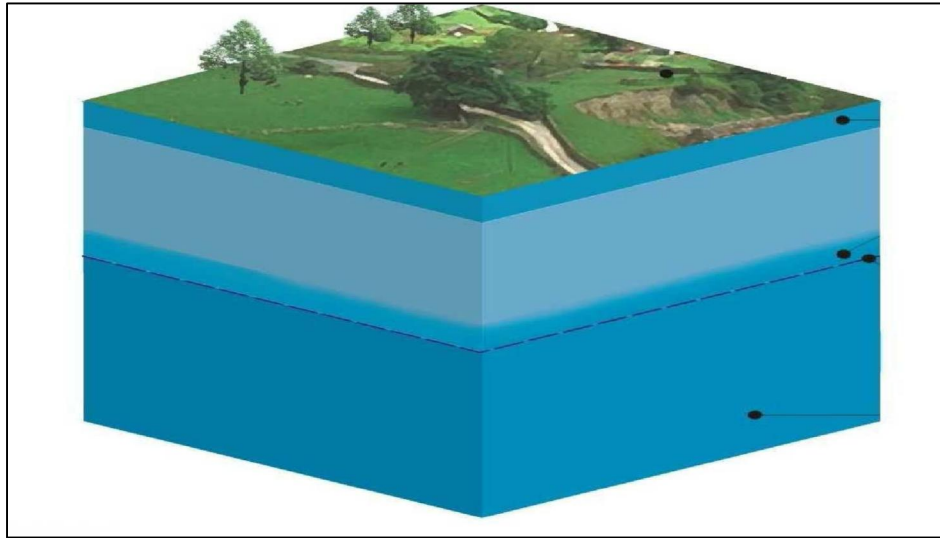
Figura 4. Tipos de acuíferos según su comportamiento hidráulico.



Fuente: Molinero. J., 2011, modificado de UK-Groundwater Forum: "Groundwater, our hidden asset".BGS.

1.4.1.1. Acuíferos no confinados o libres. Son aquellos en los que el nivel superior de saturación se encuentra a presión atmosférica debido a que no tienen ningún manto impermeable por encima de ellos, o sea que el manto que esta sobre ellos es una formación geológica porosa y permeable(Molinero., J. 2011). A la superficie piezométrica de un acuífero libre se le denomina superficie o nivel freático. Ver figura 5.

Figura 5. Esquema de un acuífero libre



Fuente: Molinero. J., 2011, modificado de UK-Groundwater Forum: "Groundwater, our hidden asset".BGS.

1.4.1.2. Acuíferos Confinados O Cautivos. Corresponden a formaciones geológicas permeables, completamente saturadas de agua, confinadas entre dos capas o estratos que podemos asumir como impermeables por ejemplo una capa de arenisca entre dos mantos de arcilla, por lo tanto, en estos casos el agua del acuífero está sometida a una presión de confinamiento, que será la suma de la presión hidrostática más la presión litostática de la capa impermeable, estos pueden ser: acuitardos o acuicludos

- **Acuitardos** (del latín "tardare"= retardar), son aquellas formaciones semipermeables que, conteniendo agua incluso en grandes cantidades, la transmiten muy lentamente, verticalmente pero no de manera lateral.
- **Acuicludos** (del latín "claudere"= cerrar), que consisten en aquellos estratos o formaciones porosas pero impermeables y que, por lo tanto,

pueden almacenar agua pero no permiten ningún tipo de flujo a su través.

Dentro de los acuíferos confinados tenemos los llamados acuíferos artesianos (Ver figura 4). Son aquellos donde la superficie piezométrica se encuentra por encima del nivel del suelo.

Cuando se pone en contacto un acuífero artesiano con el aire, el agua emerge espontáneamente. Cuando se realiza la extracción de agua de un acuífero libre esta, proviene en su mayoría de la zona de recarga. Mientras que en los acuíferos confinados el agua que se extrae no proviene en gran medida de la zona de recarga sino del propio almacenamiento y son cedidos por compresión elástica del acuífero, efecto motivado por la disminución gradual de la presión que soporta el peso de la formación confinante (Teoría clásica de Meinzer sobre la compresibilidad y la elasticidad de los acuíferos artesianos), además el agua cedida por el almacenamiento proviene de la expansión propia del agua, y asimismo en algunos acuíferos, gran parte del volumen de agua obtenido al disminuir el potencial proviene de la compresión inelástica de lentejones o capas de limo o arcilla, intercalados en el acuífero o en contacto con él.

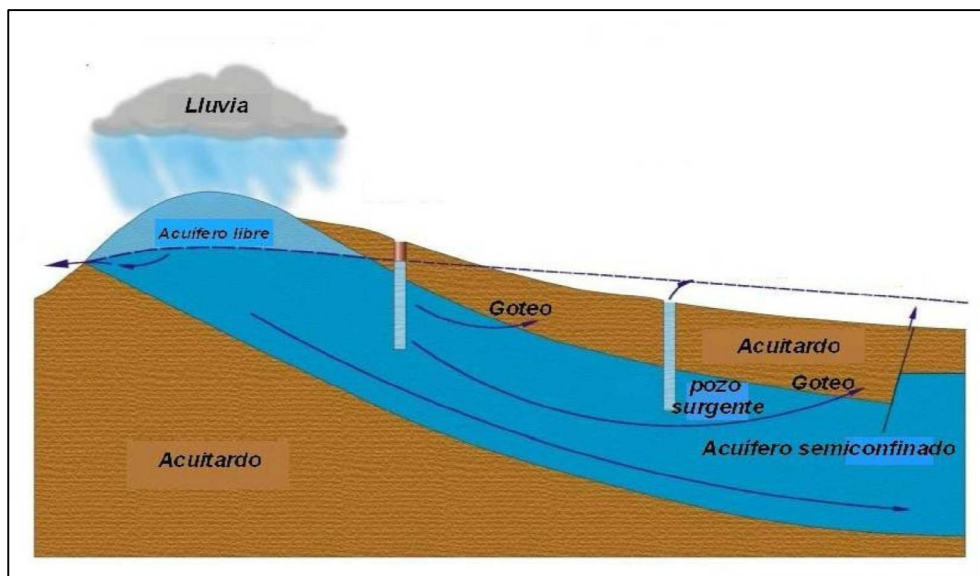
Además de los tipos de acuíferos anteriores también debemos considerar el siguiente tipo de acuífero:

- **Acuifugos** (del latín fugere= huir), que serían rocas con porosidad nula y, por lo tanto, incapaces de almacenar y transmitir agua.

1.4.1.3. Acuíferos Semiconfinados. Corresponden a situaciones similares a las que presentan los acuíferos confinados (Ver figura 5), pero con la particularidad de que el estrato confinante corresponde a un acuitardo, en lugar de a un acuifugo o acuicludo.

Por lo tanto, los acuíferos semiconfinados pueden recibir cierta recarga, por infiltración vertical muy lenta a través del material confinante semipermeable, llamada goteo. La figura 6, muestra un esquema del funcionamiento de un acuífero semiconfinado.

Figura 6. Sistema hidrogeológico de un acuífero semiconfinado



Fuente: Molinero. J., 2011, modificado de UK-Groundwater Forum: "Groundwater, our hidden asset".BGS.

1.4.2. Propiedad de los Acuíferos

1.4.2.1. Temperatura. Las aguas subterráneas gozan por lo general, de una constancia de temperatura que las aguas de circulación superficial no pueden poseer nunca, sometidas como están a evaporaciones, intercambios térmicos con el aire exterior y el terreno de superficie, radiación solar etc.

En las aguas de capas (porosidad primaria) tienen temperaturas que varían mucho con la extensión y penetración de la capa en el suelo. Si no hay influencia térmica de aguas superficiales, un agua de capa que circule muy lentamente por un estrato impermeable situado a 100 m de profundidad poseerá una temperatura superior en dos o tres grados a otra que se encuentre en un terreno compacto situado solamente a 30 m abajo de la superficie, según la ley del gradiente geotérmico. En promedio por cada dos grados de latitud que nos alejemos del ecuador la temperatura disminuye 1 °C y por cada 150 m, en altitud, la variación de la temperatura es de 1 °C.

En las aguas de fisuras anchas (calizas y sistemas de porosidad secundaria), por la alta permeabilidad de los sistemas, las aguas pérdidas o abismadas imponen rápidamente su temperatura a las paredes de las galerías subterráneas por las que circulan. Saliendo al aire libre por las resurgencias estas aguas siguen por lo general las fluctuaciones térmicas observadas en el nivel de las aguas perdidas. No ocurre lo mismo en el caso de las emergencias. El agua que circula por la superficie de las calizas penetra en pequeñas cantidades por una infinidad de fisuras cuya función térmica sobre el agua es importante.

1.4.2.2. Radioactividad. Otra característica es la radiactividad de las aguas subterráneas, fenómeno no exclusivo de las aguas termales. Se agrega que no son tampoco las aguas de origen más profundo las que poseen siempre mayor radiactividad.

1.4.2.3. Conductividad Eléctrica. Es variada según los intercambios químicos y aportes de agua exterior, e informa sobre su riqueza en electrolitos disueltos.

1.4.2.4. Turbidez y Transparencia. Estas propiedades de las aguas de circulación varían en muchas ocasiones con su caudal. Las aguas de capas, contrariamente permanecen transparentes casi siempre por la filtración del sistema. Las de calizas presentan características intermedias entre las aguas de circulación y las de capas, dependiendo de la evolución del terreno calcáreo.

Si el color es, por regla general, muy débil, salvo cuando están cargadas con sales de hierro, el sabor de unas aguas depende de las sales y de los gases en suspensión o solución. Y el olor de las no termales, resulta, por lo general, inodoro cuando son potables o fétido, similar al del hidrógeno sulfurado, cuando proceden de charcas por la descomposición de material orgánico.

1.4.2.5. Composición (salinidad). Desde el punto de vista químico cada fuente tiene una composición que depende de la constitución de las zonas subterráneas atravesadas y que le cede o con las que ha intercambiado sustancias.

Las sales alcalinas son muy frecuentes, el cloruro de sodio se encuentra casi siempre y en cantidad generalmente aceptable para la alimentación humana.

Los sulfatos alcalinos son más raros. El carbonato de calcio, con el sulfato de calcio es el elemento mineral más importante de las aguas subterráneas.

La dureza del agua por la presencia de sales alcalino-terrosas, como las de calcio y magnesio, se modifica en las diferentes regiones. Pero se puede distinguir acá la dureza temporal de la permanente, explicada la primera por la presencia de carbonatos y la segunda por sulfatos.

El hierro existe a menudo en las aguas subterráneas pero es inestable bajo la forma de bicarbonato ferroso. El manganeso sigue de cerca al hierro, eliminándose con menor facilidad. El plomo y los nitratos o nitratos bastantes infrecuentes, indican habitualmente contaminación.

Desde el punto de vista bacteriológico las aguas de resurgencia (fisuras) siempre son sospechosas en su aspecto biológico, las aguas de exsurgencias (fisuras) pueden ser buenas pero conviene vigilarlas siempre. Las aguas de pozos (capas) deben estar bajo vigilancia y las de fuentes (capas) resultan buenas por lo general.

1.5. ORIGEN Y PROCEDENCIA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

Ellas proceden de la precipitación y la condensación (ciclo del agua), excepto otras como las aguas connatas o fósiles (sedimentarias) y las juveniles (magmáticas). Las aguas subterráneas originadas en el ciclo del agua se denominan aguas vadosas o meteóricas, las otras se denominan de acuerdo a su origen (Vélez, M., 1999.):

- "Precipitaciones ocultas" son aguas que provienen de la condensación del vapor de agua atmosférico en los poros del suelo.

- Aguas juveniles que son aquellas de origen profundo, como es el caso de un magma granítico que al enfriarse expulsa un pequeño volumen de agua. Estas aguas provienen del interior de la tierra y nunca han estado en contacto con la superficie.
- Aguas fósiles que son aguas vadosas atrapadas en el terreno y que permanecen en él durante miles de años. Es el caso de las aguas en el Sahara que se estima entraron al acuífero hace 300.000 o 400.000 años.
- Aguas geotermales que son aguas vadosas que siguen un camino complicado, calentándose en las zonas profundas y volviendo a subir a la superficie.
- Aguas marinas que son las aguas del mar que han invadido recientemente los sedimentos costeros.

Aproximadamente el 3% del agua total en la tierra es agua dulce. De esta un 95% constituye aguas superficiales, 3.5% corresponde a aguas subterráneas profundas y 1.5% a la humedad acumulada en los suelos. De todo el agua dulce existente solo un 0.36% está disponible para su consumo (Leopold, 1974).

El agua subterránea es una fuente importante de suministro de agua. 53% de la población de los EE.UU. recibe agua de fuentes subterráneas. El agua subterránea es además una de las principales fuentes de uso industrial y agrícola.

Se está extrayendo agua de los acuíferos a tasas superiores a su reposición. El agua en algunos acuíferos tiene milenios de antigüedad y se

sitúa debajo de algunas de las regiones más secas que existen en la actualidad en la tierra.

A pesar de que las personas han extraído para su uso agua de fuentes naturales y pozos desde tempranas civilizaciones, en los últimos 50 años la multiplicación de las poblaciones hace que se necesiten más agua y alimentos provocando una mayor explotación de los recursos hídricos.

En algunas áreas costeras se ha extraído tanta agua dulce de acuíferos que se ha provocado una intrusión de agua salada, provocando que las aguas de pozo sean salobres y no pueda ser usada.

En algunos lugares el vaciamiento de acuíferos ha causado serios problemas de subsidencia o gran decrecimiento de las aguas de la mesa de agua:

- **USA:**

- San Joachim Valle, CA - 10 metros.
- Phoenix, AZ - más de 1 metro.
- Houston - Galveston, TX - 1 metro.
- Milwaukee - nivel freático cae 114 metros en 1976.
- Chicago, IL - nivel freático cae 274 metros en 1979. Parcialmente recuperado desde entonces gracias a la disminución de las extracciones de agua.
- Acuífero Ogallala - algunos pozos se han secado en Oklahoma, Kansas y en Texas, donde el nivel freático ha disminuido 30 metros.

- **MÉXICO:**

- Ciudad de Méjico - el centro de la ciudad retrocede (subsistencia) 7.5metros desde 1950.
- Ciudad Juárez/El Paso (frontera con EE.UU.) - el acuífero que abastece a 1.5 millones de personas se espera que sea agotado en 30 años.

- **LIBIA:**

- 1 billón de metros cúbicos de agua al año se extraen en Libia debajo del Sahara y por medio de tuberías se extrae para abastecer granjas y ciudades del norte.

- **LIBANO:**

Explotación de acuíferos debajo de Trípoli que provoca una deficiencia anual de 3.8 millones de metros cúbicos.

- **YEMEN:**

- el nivel freático cae alrededor de 2 metros por año. Se ha escavado pozos hasta dos metros de profundidad.

- **BALUCHISTAN PAKISTAN:**

- El nivel freático cae a 3.5 metros por año.

- **PUNJAB, INDIA Y PAKISTAN:**

- El nivel freático cae a 1 metro por año.

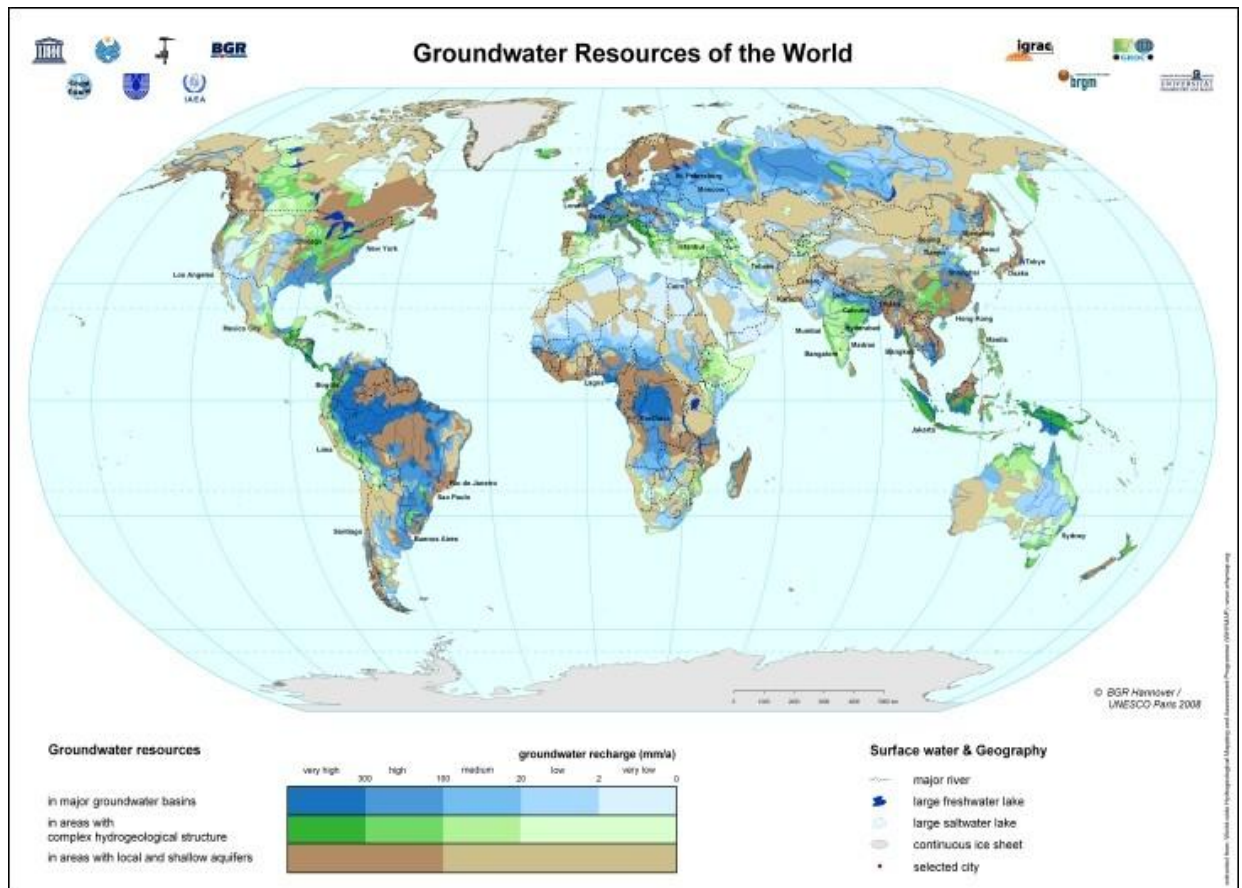
- **NORTE DE CHINA:**

- Nivel freático cae por 3 metros por año.

El agua subterránea está afectada por ingeniería del agua: por décadas y siglos, debido al uso y disposición inadecuada de residuos en el medioambiente y áreas sub-superficiales muchas aguas subterráneas se han contaminado. Los esfuerzos para proteger la calidad y cantidad del agua subterránea se han realizado en cooperación entre agencias gubernamentales, industrias e investigadores⁵.

Figura 7. Mapa de distribución de las Aguas Subterráneas de la tierra.

⁵ Tomado del medio electrónico:<http://www.lenntech.es/agua-subterranea/origen-y-cantidad-aguasubterranea.htm#ixzz1tgpIWRJF>



Fuente: Tomado del medio electrónico

http://www.whymap.org/whymap/EN/Home/gw_world_g.html?nn=1577094

1.6. ASPECTOS GEOLOGICOS DE FORMACIÓN DE FUENTES SUBTERRÁNEAS DE BAJA SALINIDAD

1.6.1. Geología. La geología es la información base para los estudios hidrogeológicos ya que define las propiedades de las rocas y las estructuras geológicas favorables para almacenar aguas subterráneas.

La cartografía geológica debe realizarse haciendo énfasis en la litología, textura, cambios de facies, tipo de porosidad, ambientes de deposición,

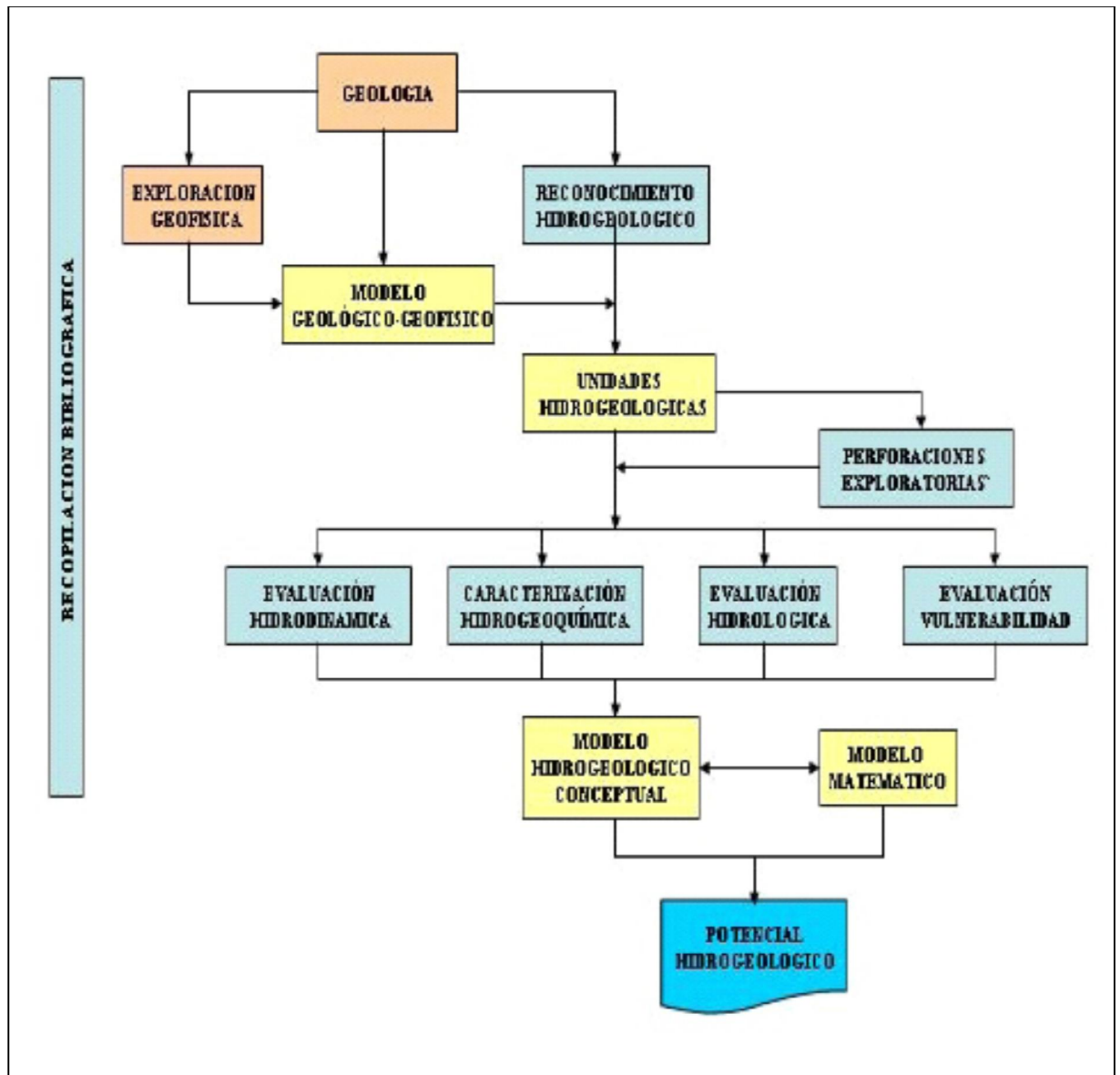
estructuras tectónicas y geomorfológicas, así como composición mineralógica de los sedimentos y rocas. Se deben utilizar herramientas y disciplinas, tales como interpretación de fotografías aéreas, imágenes de radar y satélite, estratigrafía, sedimentología, vulcanología y geología estructural, principalmente (por Ingeominas, Diciembre de 2004).

1.6.2. Exploración Geofísica. La geofísica estudia las propiedades físicas del subsuelo y permite correlacionarlas con la geología, lo cual en el caso de la exploración de aguas subterráneas contribuye a determinar la presencia y la geometría de los acuíferos o zonas acuíferas y la obtención de un modelo conceptual, que a su vez se valida con perforaciones exploratorias. Se debe hacer uso de las metodologías convencionales tales como resistividad, gravimetría, sísmica, magnetometría, electromagnetismo, registros geofísicos de pozos y nuevas técnicas como la resonancia magnética de protones o nuclear.

La exploración geofísica se utiliza también para:

- Estimación del nivel de la profundidad del agua subterránea.
- Estimación del espesor de la zona no saturada.
- Estimación de la porosidad de la roca.
- Contribución a la identificación de los ambientes de deposición.
- Determinación del grado de mineralización de las aguas subterráneas.
- Localización de fracturas.
- Identificación de reservorios geotérmicos y aguas termales.

Figura 8. Diagrama de flujo metodológico de exploración hidrogeológica regional.

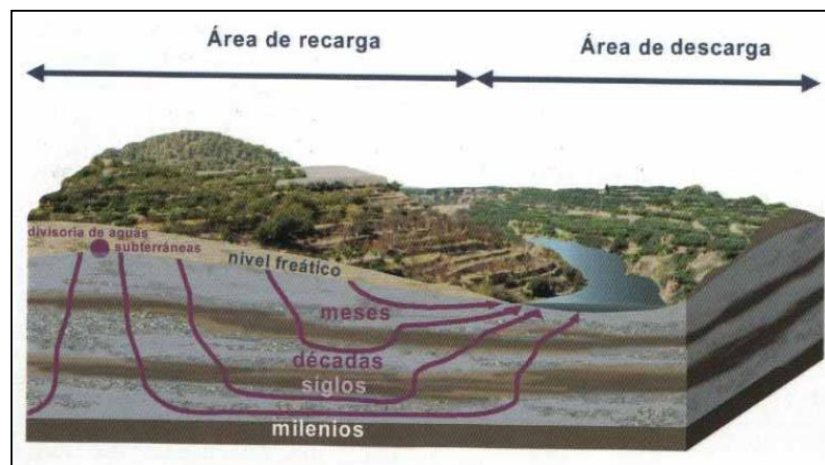


Fuente: Tomado del programa de exploración de aguas subterráneas de Ingeominas Diciembre 2004

1.6.3. Gestión del agua subterránea. Es el agua existente bajo la superficie del terreno. En concreto, es aquella situada bajo el nivel freático y que está saturando completamente los poros u fisuras del terreno. Esta agua fluye a la superficie de forma natural a través de manantiales, áreas de rezume, cauces fluviales o bien directamente al mar. Puede también dirigirse artificialmente a pozos, galerías y otros tipos de captaciones, se renueva de modo constante por la naturaleza, merced a la recarga, esta recarga procede principalmente de las precipitaciones, pero también puede producirse a partir de escorrentía superficial y cursos superficiales de agua (sobre todo en climas áridos), de acuíferos próximos o de retornos de ciertos usos (destacan los retornos de los regadíos).

El agua subterránea se desplaza muy lentamente por los acuíferos, su velocidad media normal puede variar entre decímetros a algunas centenas de metros al cabo del año, solo en el caso de acuíferos kársticos y rocas muy fracturadas pueden existir conductos preferentes.

Figura 9. Áreas de recarga y descarga de aguas subterráneas



Fuente: Molinero. J., 2011, modificado de UK-Groundwater Forum:
“Groundwater, our hidden asset”.BGS.

En la figura 9. Se observan las áreas de recarga y descarga, así como las líneas de flujo y tiempo de desplazamiento del agua en un acuífero desde que alcanza la zona saturada hasta su salida a la superficie según diferentes trayectorias.

El nivel freático conforma el límite superior de la zona saturada en un acuífero libre. Es el lugar geométrico de los puntos de un acuífero libre que se encuentran a la presión atmosférica, su altura en un acuífero libre viene determinada por la cota que alcanza el agua en un pozo poco penetrante en reposo.

1.6.3.1. Alimentación de los niveles freáticos subterráneos

- **Infiltración Natural**

La infiltración se produce en el terreno por la acción conjunta de dos fuerzas, a saber la gravedad y la atracción molecular, las que pueden actuar en un mismo sentido o bien en forma opuesta, según las circunstancias. La magnitud de la infiltración y por lo tanto de la alimentación de los niveles freáticos subterráneos, se ve influenciada por dos tipos de condiciones; las que dicen relación con las precipitaciones, que constituyen la fuente misma de origen del agua, y las que dicen relación con las condiciones del terreno, que son las responsables de las mayores o menores facilidades existentes para la infiltración y que determinan finalmente la proporción de las precipitaciones que pueden llegar a constituir una recarga de los niveles freáticos subterráneos. En este segundo tipo deben incluirse además las condiciones geológicas del subsuelo que son las que fijan la existencia y potencia de rellenos

permeables, es decir, determinan la capacidad del subsuelo para recibir y regular el agua proveniente de las infiltraciones.

De acuerdo con los conocimientos que se tienen del ciclo hidrológico, las precipitaciones que caen sobre la tierra siguen distintos caminos, los que en rasgos muy generales pueden resumirse en: una parte no alcanza a llegar al suelo siendo retenida por el follaje de la vegetación, esta parte que recibe el nombre de intercepción, es devuelta nuevamente a la atmósfera por evaporación. La parte que llega al suelo se mueve a través de la superficie de éste en un proceso designado como infiltración. Si la intensidad de las precipitaciones sobrepasan la capacidad de infiltración del terreno, se produce un movimiento de agua por su superficie, conocido con el nombre de escurrimiento superficial, cuyo caudal en cada instante es igual a la diferencia entre la intensidad de la precipitación y la capacidad de infiltración del suelo.

Del agua infiltrada en el terreno, una parte vuelve por capilaridad a la superficie donde se evapora, o bien es extraída por las raíces de las plantas y utilizada en su proceso de transpiración.

Del resto del agua infiltrada una parte queda destinada a completar la "capacidad de retención" del suelo en la zona no saturada e incluso su capacidad capilar ubicada inmediatamente sobre el nivel de saturación, mientras el saldo continúa su descenso por acción de la gravedad pasando a constituir lo que ya hemos designado como la recarga de los niveles freáticos subterráneos.

En la naturaleza estos procesos no se presentan aislados unos de otros, sino que normalmente tienen lugar en forma simultánea y aún más, entrelazada, siendo el caso, por ejemplo, que parte del agua infiltrada

puede constituirse en escurrimiento superficial a través de afloramientos y vertientes, o bien el caso inverso, que es de gran importancia práctica, en que se tienen recargas apreciables de los niveles freáticos subterráneas a través de la infiltración en su lecho de corrientes superficiales.

La proporción que corresponde en definitiva a cada uno de estos caminos del total de agua caída es muy variable de acuerdo con las condiciones climáticas, topográficas y geológicas del lugar, siendo sumamente difícil poder precisarlas con exactitud debido a la complejidad de todos los factores que intervienen en los procesos.

Para un mismo lugar, la infiltración hacia los niveles freáticos subterráneos depende fundamentalmente de la distribución de las precipitaciones. Ella es muy diferente si una misma altura de lluvia cae concentrada en un lapso muy corto de tiempo o bien distribuida en un período más o menos largo. Por ejemplo, una misma lluvia en la temporada de verano producirá una mayor recarga de los niveles freáticos si cae en forma persistente durante un cierto período de tiempo con una intensidad similar a la capacidad de infiltración del terreno; si cae distribuida en lluvias ocasionales durante un período de largo, producirá un gran beneficio para la agricultura, pero muy poca o ninguna infiltración subterránea; por otra parte, si se presenta como aguaceros concentrados en tiempos cortos, la mayor parte escurrirá superficialmente siendo la infiltración mínima. En general, las precipitaciones producen una mayor recarga de los niveles freáticos subterráneas cuando tienen lugar en invierno más bien que en verano⁶.

⁶Programa de exploración de aguas subterráneas, Ingeominas Diciembre 2004

La recarga de la zona de saturación debida a la aportación de las precipitaciones atmosféricas puede descomponerse en tres etapas, que son:

- a. Infiltración del agua desde la superficie al terreno que yace inmediatamente bajo ella.
- b. Movimiento descendente del agua a través de la zona de aireación o no saturada.
- c. Entrada del agua en la zona de saturación, donde pasa a formar parte de las propiamente llamadas aguas subterráneas.

Evidentemente, una parte del agua que entra en la zona de aireación vuelve a la atmósfera por evaporación y transpiración vegetal, perdiéndose así su incorporación a la zona de saturación.

La infiltración se produce, como hemos dicho antes, por la acción combinada de las fuerzas de gravedad y de atracción molecular. Cuando la humedad del suelo es reducida y una gota de agua de lluvia toca la superficie del terreno, las fuerzas moleculares de éste la atraen y hacen que se absorba rápidamente. En este proceso, el propio peso de la gota de agua tiene una importancia totalmente secundaria.

Cuando la superficie del terreno va humedeciéndose más y más, el proceso de atracción molecular va perdiendo intensidad y la infiltración tiene lugar debido, cada vez más, a la atracción gravitatoria. Así como en la primera fase la permeabilidad del terreno era secundaria en comparación con el desequilibrio de humedad del suelo, en esta segunda es la permeabilidad la que fundamentalmente determina la velocidad de penetración del agua.

El manto de evaporación o de terreno vegetal es de importancia fundamental para la plantas, ya que está en el embalse de donde éstas extraen el agua para su sustento. Esta agua almacenada está mantenida en posición por las fuerzas de atracción molecular, que le impiden su descenso a zonas más profundas. No obstante, las raíces de las plantas tienen capacidad para extraer el agua necesaria para su vida.

Durante la época del crecimiento de las plantas, el contenido de humedad de este almacén formado por el terreno vegetal se vacía a causa de la constante succión realizada por ellas y se vuelve a llenar periódicamente por efecto de las lluvias o de los riegos. En consecuencia, el manto de evaporación o de terreno vegetal constituye un obstáculo para la recarga de la zona de saturación. Es como un embalse superior que debe llenarse antes de que el agua pase a los embalses subterráneos inferiores de la zona de saturación.

Cuando el suelo vegetal en un punto determinado está saturado, cualquier nueva adición de agua que reciba su superficie descenderá por gravedad desde el manto de evaporación, ya sea directamente a la zona de saturación o al manto intermedio de la zona de aireación. Puesto que este manto intermedio no está afectado apreciablemente ni por la evaporación superficial ni por la absorción de las raíces de las plantas, normalmente retiene toda el agua que puede contener por efecto de las fuerzas de atracción molecular. Sin embargo, la mayor parte del agua tiende a descender más aun obedeciendo a las fuerzas de gravedad.

Evidentemente, también puede parte del agua atravesar el manto de evaporación superficial, incluso aun cuando exista una falta considerable de humedad en alguno de sus puntos, a través de conductos tales como los creados por las raíces podridas de las plantas o por los agujeros

hechos por gusanos o animales de mayor tamaño. Por otra parte, el terreno vegetal puede también estar temporalmente empapado en un grado superior a lo que se considera el límite de su retención específica y, desde luego, hasta el punto de su saturación completa.

Puesto que el subsuelo en muchos puntos es menos permeable que el propio suelo vegetal, es posible que en momentos de abundante infiltración se retarde la filtración, descendente y se cree en el mismo suelo vegetal una zona de saturación superior temporal. Estas zonas de saturación, someras y temporales se encuentran en muchos sitios durante épocas de lluvias prolongadas y fuertes o en la época del deshielo, especialmente a principios de primavera.

Después van quedándose exhaustas, ya sea por filtración vertical o por infiltración hacia otras corrientes de agua e incluso, durante la estación de crecimiento vegetal, por efecto de la absorción de las raíces. Aunque estos mantos desaparecen rápidamente, especialmente cuando empieza el ciclo de crecimiento vegetal, la mayor parte de la recarga de la zona de saturación permanente, que yace bajo ellos, se realiza generalmente durante la existencia de estas masas de agua temporalmente colgadas.

En climas fríos, en donde el terreno se hielva hasta profundidades de un metro o más, este terreno helado resulta muy impermeable. En la primavera, conforme el terreno se va deshelando, desde la superficie hacia abajo, el terreno deshelado va progresivamente saturándose con el agua de las lluvias y las procedentes del propio deshielo.

Cuando desaparece la última parte del terreno helado, esta agua colgada generalmente desciende rápidamente y puede incluso, en el curso de

unos pocos días, dar origen a la principal aportación de agua subterránea a los mantos inferiores durante todo el año ⁷.

La manera precisa según la cual el agua desciende a la zona de saturación no está todavía completamente explicada, aunque los recientes estudios realizados por un gran número de investigadores han contribuido grandemente a la solución de este problema.

Cuando ocurren estos procesos de recarga rápida que acabamos de explicar, el agua indudablemente llena la red de intersticios y desciende como lo haría en un tubo capilar bajo una presión hidráulica suficiente. Sin embargo, después de que los mayores caudales de recarga han pasado a través de ellos, dejan tras sí películas de agua que se adhieren a las paredes de los intersticios, especialmente a las que presentan formas angulosas. También queda agua en los intersticios o grupos de intersticios que quedan llenos cuando las columnas capilares se han roto bajo ellos a causa de las irregularidades en el sistema de intersticios interconectados.

Toda esta agua está mantenida en su posición, desde luego, por atracción molecular, pero una considerable parte de ella sólo se mantiene temporalmente, se ha podido comprobar que el descenso continúa durante largo tiempo con una intensidad decreciente

- **Infiltración de las Corrientes Superficiales**

Las corrientes se clasifican en general en dos categorías: corrientes influentes y corrientes efluentes.

⁷ Green, J. y Trett., M.W, 1989. The Fate and Effects Of Oil In Freshwater. Pág 338.

En las primeras, el nivel de las aguas superficiales está por encima de la superficie freática libre y el agua pasa desde la corriente superficial a la zona de saturación. Por el contrario, una corriente se llama efluente si su nivel está por debajo del nivel freático y, por tanto, recibe aportaciones de agua subterránea de los mantos de las laderas.

En algunas regiones relativamente lluviosas, casi todas las corrientes de agua de flujo perenne o casi perenne son efluentes. En estas regiones, la recarga tiene lugar en las zonas existentes entre dos ríos o arroyos, de manera que las corrientes sirven como canales de drenaje natural que descargan el exceso de caudal de los almacenes subterráneos de agua.

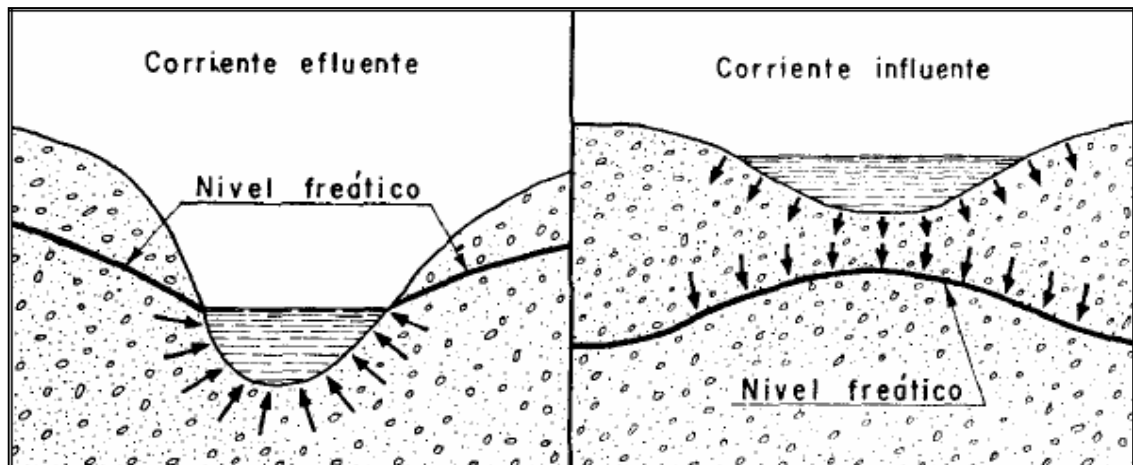
La recarga tiene lugar principalmente por la penetración vertical de la lluvia y del agua de las nieves en la inmediata vecindad de su punto de precipitación. Sin embargo, cuando la intensidad de precipitación de lluvia o nieve es superior a la velocidad con que puede infiltrarse el agua a través de la superficie del terreno, este exceso de precipitación correrá sobre la superficie en la dirección de su máxima pendiente.

Al principio de una lluvia, la escorrentía se presenta en forma de una lámina fina irregular de agua, pero muy pronto el agua superficial se concentra a lo largo de las vaguadas o depresiones y forma las corrientes intermitentes que llevan el agua al sistema de corrientes perennes. De esta forma, las partes bajas de las vaguadas y de los canales de estas corrientes superficiales temporales transportan el agua durante un período de tiempo más largo y con mayor carga hidráulica que la que se produciría solamente por la precipitación y por lo tanto, en ellas se produce una infiltración mayor que la media, siendo especialmente

eficaces en cuanto se refiere a la recarga de los depósitos de aguas subterráneas inferiores.

Es éste un aspecto importante de la cuestión, que muy a menudo se ha pasado por alto por aquellos que sostienen que la recarga directa de lluvia o nieve es despreciable o nula.

Figura 10. Corrientes influentes y corrientes efluentes.



Fuente: Molinero. J., 2011, modificado de UK-Groundwater Forum: "Groundwater, our hidden asset".BGS.

Existen otras zonas en que la mayor cantidad de precipitación de lluvia y nieve cae sobre las montañas, mientras que los valles, muchos de los cuales constituyen llanuras desérticas, son generalmente muy áridos. En esta región, la mayor parte de las corrientes nace en las montañas, donde son alimentadas por manantiales y la fusión de las nieves y se hacen, por tanto, influentes cuando pueden ya dejar los cañones montañosos y fluir sobre las pendientes aluviales de gravas permeables creadas por ellas mismas.

- **Recarga Proveniente de Regadíos**

Es interesante considerar que por efecto de regadío aplicado a los terrenos de cultivo, se produce en ellos una infiltración de una cierta parte del agua aplicada que pasa a constituir una nueva fuente de alimentación para los niveles freáticos subterráneos. Del total del agua que se aplica en riegos en una zona, una parte normalmente importante se gasta en lo que se designa como “consumo evapotranspirativo” o “tasa neta” (agua transpirada por la planta y retenida en su tejido durante su crecimiento, más la evaporada desde la superficie del terreno), otra parte escurre superficialmente mientras que el saldo resultante se infiltra hacia las capas del subsuelo constituyendo la recarga ya referida de los niveles freáticos.

De acuerdo con algunos estudios realizados puede estimarse en una primera aproximación que esta recarga bien puede representar en términos medios alrededor de un 20% a un 30% del agua aplicada, y en algunos casos aún más.

- **Alimentación Artificial**

Otro factor de recarga que en algunos casos puede aplicarse con éxito es la “recarga artificial”. Consiste esencialmente en facilitar la infiltración de agua superficial hacia el subsuelo en los lugares apropiados para el objeto. Aun cuando el aprovechamiento de los volúmenes infiltrados como recursos de agua subterránea en secciones ubicadas más hacia aguas abajo no puede ser completo, esta recarga se justifica si los volúmenes infiltrados no pueden tener otro aprovechamiento perdiéndose en caso contrario por escurrimiento hacia el mar.

Esta recarga se puede realizar mediante pozos, por zanjas o bien por lagunas de infiltración. Indudablemente que las áreas de infiltración pueden colmatarse si el agua de que se dispone no es muy clara, problema que debe ser tenido en cuenta muy especialmente en cada caso particular. Las tasas de recarga deben determinarse por lo general por experimentación directa en el terreno.

La recarga del tipo superficial, que se realiza por medio de canales, fosos o bien zonas de inundación, se prefiere normalmente debido a su menor costo de instalación y también por su mayor facilidad de operación y menores gastos de explotación.

La recarga del tipo profundo, que se realiza por medio de pozos profundos y galerías, se emplea cuando la napa por alimentar se encuentra separada de la superficie del terreno por una o varias capas continuas poco permeables y también cuando no es posible aplicar sistemas superficiales como por ejemplo es el caso de zonas urbanas.

Para abastecimiento de agua potable y desde un punto de vista económico, se producen grandes economías al utilizar este tipo de abastecimiento dado que normalmente se elimina la necesidad de plantas de tratamiento. La realimentación produce también economías en los equipos de elevación y en los gastos de energía que dichos equipos requieren.

Para el caso de la recarga del tipo superficial el mecanismo bajo el cual ella se realiza incluye las siguientes tres fases que se indican a continuación:

✓ **Infiltración**

Corresponde a la adsorción del agua por las capas más superficiales del terreno. Es una condición fundamental para el éxito de una instalación de recarga superficial el contar con una buena capacidad de infiltración. Las formaciones superficiales pueden recubrirse de una delgada capa de suelos muy finos la que debe ser eliminada periódicamente. La tasa de infiltración se ve afectada también por la calidad química del agua; se ha verificado que las aguas duras con alto contenido de Ca^{2+} y Mg^{2+} se infiltran más rápidamente que aquellas con contenido elevado de Na^{+} .

Un problema importante es el planteado por los sedimentos en suspensión que puede contener el agua. Según experiencias norteamericanas un m^3 de grava puede absorber alrededor de 200 kg de sedimentos sin que su capacidad filtrante se vea reducida considerablemente; las arenas se colmatan sin embargo mucho más rápidamente. Los materiales en suspensión se depositan mucho más fácilmente en aguas quietas que en aguas corrientes.

Se ha constatado también que suelos cubiertos por una vegetación adecuada (por ejemplo pasto Bermuda) se colmatan menos que los suelos desnudos.

Aún en ausencia de materiales en suspensión, la tasa de infiltración sufre una reducción paulatinamente en el tiempo debido principalmente al desarrollo de microorganismos en medio anaeróbico. Si cesa la sumersión por una temporada el suelo recupera su capacidad de infiltración.

En algunos casos ha resultado económicamente más conveniente reemplazar la capa superficial, natural o artificial, antes que pretender eliminar los sedimentos infiltrados.

✓ **Percolación**

Al comienzo del proceso de recarga, la velocidad de percolación sufre las mismas variaciones que la velocidad de infiltración. Finalmente, sin embargo, la velocidad de percolación puede alcanzar un valor igual a la permeabilidad vertical del terreno.

✓ **Filtración**

El escurrimiento se describe por las leyes normales de la hidrodinámica: ley de Darcy y ecuación de la continuidad. Desde un punto de vista físico químico los medios porosos se comportan como depuradores muy eficaces. Algunas decenas o a lo más algunas centenas de metros de filtración bastan para eliminar completamente microorganismos.

Es necesario para esto que las aguas de recarga se encuentren suficientemente oxigenadas ya que en caso contrario las aguas captadas pueden resultar muy agresivas. Se ha constatado que aguas con contenidos elevados de materia orgánica o iones intercambiables, especialmente Na^+ y H^+ , han provocado rápidamente la colmatación de un acuífero.

Finalmente, siempre en relación con la recarga de tipo superficial, caben señalar algunos de los procedimientos que suelen utilizar para reducir los efectos de la colmatación superficial:

- a. Tratamiento previo de las aguas mediante cloro, oxigenación, sulfato de cobre, para la destrucción de la materia orgánica.
- b. Decantación previa de los materiales en suspensión.

- c. Mantenición de condiciones aeróbicas mediante la aplicación de espesores delgados de agua, sumersión alternada, aireadores en cascada, etc.
- d. Mantenición de cubierta vegetal.

La recarga de tipo profundo se ha practicado en mucho menor escala por razones de colmatación muy rápida que ha afectado a muchas instalaciones. Las causas que se señalan para esto son múltiples: obstrucción de rejillas por sedimentos en suspensión, formación de una capa biológica en torno a las rejillas de pozos, arrastre de aire, incrustación por precipitación de sales, etc.

Los remedios que se han utilizado también son variados: tratamiento de los pozos por ácidos, bombeo, cloración, filtración previa de las aguas, grandes aberturas de rejillas, inyección de agua por el fondo de los pozos para evitar formación de burbujas de aire, etc.

1.6.3.2. Condiciones determinantes de la recarga. Las condiciones que determinan la velocidad y caudal de la recarga de aguas subterráneas pueden ser de dos categorías: aquellas relacionadas con la precipitación, como verdadera fuente de abastecimiento, y aquellas relacionadas con la facilidad de entrada del agua en el terreno, las cuales determinan la proporción de agua de lluvia o nieve que alcanza los depósitos subterráneos.

La intensidad de la recarga debida a las corrientes superficiales influentes depende grandemente del estado del lecho de las corrientes. Aunque el terreno por el que transcurre un río sea muy permeable, la infiltración puede ser reducida, a causa de que el lecho se haya impermeabilizado por arrastres de limos arcillosos o por deposiciones calizas que cementen los materiales del fondo. Cuando el río está sujeto a crecidas fuertes, éstas

suelen lavar los depósitos impermeables y aumentar la capacidad de infiltración del lecho del río. Los embalses de regulación tienden a anular este efecto beneficioso de lavado, al suprimir las grandes avenidas. Por otra parte, los embalses son favorables a la infiltración en cuanto decantan el agua de elementos arcillosos finos, de modo que las deposiciones impermeables limosas aguas abajo pueden ser más reducidas.

En general, la proporción de precipitación que puede transformarse en aguas subterráneas aumenta con la precipitación, pero sólo hasta un cierto límite. Si las precipitaciones tienen lugar en forma de lluvias ligeras y dispersas pueden todas ellas ser absorbidas por el terreno. Las lluvias que tienen lugar después de que la falta de humedad del suelo ha sido satisfecha son precisamente las que tienen utilidad en la recarga del almacén de aguas subterráneas.

En la mayor parte de las zonas lluviosas de los Estados Unidos, una tercera parte de la precipitación llega al depósito subterráneo; pero en las regiones semiáridas, la recarga puede ser solamente un porcentaje muy pequeño de la precipitación y en grandes llanuras muy áridas la cantidad que constituye la recarga puede ser extraordinariamente pequeña o nula completamente.

Tabla 2. Porcentaje de distribución del agua lluvia según el terreno.

Naturaleza del terreno	Evaporación	Escorrentía	Filtración
	%	%	%
1. Terreno arcilloso horizontal, sin intercalaciones de bancos permeables.	75	22	3
2. Terreno arcilloso silíceo con algo de caliza (tierra de labor) horizontal.	50	5	45
3. El mismo caso 1, pero con pendiente del terreno.	53	45	2
4. El mismo caso 2, pero con pendiente en el terreno.	45	20	35

5. Terrenos a base de areniscas compactas y poco fisuradas.	50	20	30
6. Terrenos de arenisca deleznable con fisuras.	35	5	60
7. Terrenos calizos horizontales y poco fisurados.	65	15	20
8. Terrenos calizos horizontales, pero muy fisurados.	45	5	50
9. Terrenos dolomíticos triturados (gravas miloníticas).	20	0	80
10. Terrenos calizos fisurados y en pendiente pronunciada.	25	5	70
11. Terrenos graníticos y gnéisicos, no descompuestos en su superficie.	60	30	10
12. Terrenos graníticos descompuestos en su superficie, pero sin zona semidescompuesta.	50	15	35
13. Terrenos graníticos, descompuestos en su superficie y con zona inferior semidescompuesta.	20	5	75
14. Terrenos pizarrosos no descompuestos.	50	25	25
15. Terrenos pizarrosos, descompuestos o con predominio de pizarras arcillosas.	50	40	10
16. Cuarzitas agrietadas o pizarras muy duras, también agrietadas.	40	5	56
17. Rocas volcánicas con oquedades o calizas (moladas) muy detríticas y poco compactas.	30	0	70
18. Aluviones dominando el cascajo en la superficie del terreno y con poca arcilla.	37	5	65

Fuente: Molinero. J., 2011, modificado de UK-Groundwater Forum: "Groundwater, our hidden asset".BGS.

1.6.3.3. Zonas favorables para la formación de aguas subterráneas. Con relación a la capacidad para almacenar y transmitir aguas subterráneas, los terrenos pueden clasificarse en las siguientes tres categorías:

- ✓ **Acuíferos:** formaciones de gran porosidad y permeabilidad capaces de almacenar y transmitir agua en forma apreciable (ejemplo: arena).

- ✓ **Acuifugos:** formaciones de muy baja porosidad y muy baja permeabilidad, las cuales, en consecuencia, no almacenan ni transmiten aguas (ejemplo: rocas graníticas).
- ✓ **Acuífijos:** formaciones de alta porosidad y baja permeabilidad, susceptibles de almacenar grandes cantidades de agua, pero de muy difícil extracción por los métodos corrientes de explotación (ejemplo: arcillas).

La gran mayoría de los acuíferos están contenidos en rellenos sedimentarios cuya permeabilidad o porosidad original no ha sido afectada por procesos posteriores que tiendan a cerrar los poros (cementación, compactación y metamorfismo). Un pequeño porcentaje de acuíferos aparece ligado a fracturas en rocas de cualquier tipo, cavidades de disolución en rocas calcáreas o bien aberturas producidas por escape de gas en lavas⁸.

En general, los sedimentos precuaternarios se muestran impermeables y densos por lo que son de una importancia muy secundaria en relación con aguas subterráneas.

Desde este punto de vista, las rocas pueden clasificarse en seis grandes grupos según el período geológico durante el cual se originaron y también según su capacidad para configurar acuíferos. Estos grupos se indican en la Tabla 3.

⁸ Elizabeth Bravo. Los impactos ambientales de la exploración petrolera en ecosistemas sensible

Tabla 3. Rocas representativas de sedimentos acuíferos.

Periodo geológico	Grupo	Roca representativa
Paleozoico y Prepaleozoico	1	Sedimentos metamorfoseados: Pizarras, filitas, micacitas y gneises.
Mesozoico	2	Volcanita, sedimentos continentales, sedimentos marinos, macizos intrusivos menores y sedimentos metamorfoseados.
	3	Rocas graníticas.
Terciario	4	Sedimentos marinos y continentales.
	5	Vulcanitas.
Cuaternario	6	Sedimentos continentales, sedimentos marinos en playas o terrenos contiguos a la costa actual.

Fuente: Realizado por autora del proyecto.

- **Grupo 1.**

Corresponde a las rocas designadas como zócalo fundamental por su antigüedad. Por la forma en que estas rocas se quiebran, se conocen con el nombre de piedra laja. Normalmente son duras e impermeables y densas, no presentan fracturas abiertas al paso del agua, como acuífero son totalmente nulos.

- **Grupo 2.**

Configurados por una gran diversidad de tipos de rocas predominando las vulcanitas que aparecen como potentes espesores de lavas y piroclásticas del tipo de tobas y brechas. Se encuentran también sedimentos de origen lacustre e importantes espesores de calizas. Las rocas del Mesozoico están fuertemente afectadas por procesos tectónicos presentándose a menudo recorridas por numerosas zonas de fracturamiento. Estas grietas o fracturas muchas veces se prolongan hasta la superficie donde, bajo condiciones favorables de relieve y precipitación, pueden constituir áreas de recarga subterránea. Estas condiciones se presentan en muchos sectores andinos. Su importancia como caudal es, sin embargo, relativamente pequeña.

- **Grupo 3.**

Rocas graníticas, principalmente de grano grueso y colores claros, duros y densos cuando frescas y francamente impermeables. Pueden considerarse como acuífugos típicos. Cubren amplias extensiones de la Cordillera de la Costa y en la Cordillera de los Andes que presentan además afloramientos esporádicos.

- **Grupo 4.**

Estos sedimentos se presentan relativamente mal consolidados y presentan en consecuencia alguna permeabilidad. Este grupo de rocas tiene un cierto interés potencial para el aprovechamiento de aguas subterráneas. Los sedimentos del tipo continental se presentan

esporádicamente al interior de la Cordillera Andina, son esencialmente del tipo lacustre.

- **Grupo 5.**

Las vulcanitas terciarias se continuarían en los materiales volcánicos originados por la actividad tectónica del cuaternario inferior, que con menos intensidad se continúa hasta el presente. Son fundamentalmente andesitas basálticas de colores oscuros y pueden presentarse en forma de lavas densas e impermeables como también altamente porosas por el escape de gases durante la época de su formación. Se ubican casi totalmente dentro de la Cordillera Andina, por lo que tienen un interés relativamente pequeño en cuanto a captaciones subterráneas. Muchos lagos y lagunas de la región Andina han sido formados por cordones de lava modernos y muy permeables que presentan filtraciones abundantes.

- **Grupo 6.**

Los sedimentos cuaternarios continentales contienen casi el total de los recursos de aguas subterráneas, de acuerdo a sus condiciones de origen, pueden distinguirse los siguientes tipos: sedimentos fluviales, glaciales y asociados a glaciares cuaternarios. Por su relación con el agua subterránea, los dos primeros son realmente los más importantes.

Como hemos visto a lo largo de este capítulo las aguas subterráneas de baja salinidad son de gran importancia en la supervivencia del ser humano y el medio que lo rodea, sin embargo la contaminación en nuestro planeta por el mal aprovechamiento de los recursos ha llevado a la continua degradación del mismo, a continuación quiero referenciar cómo la industria petrolera por medio de la etapa de exploración,

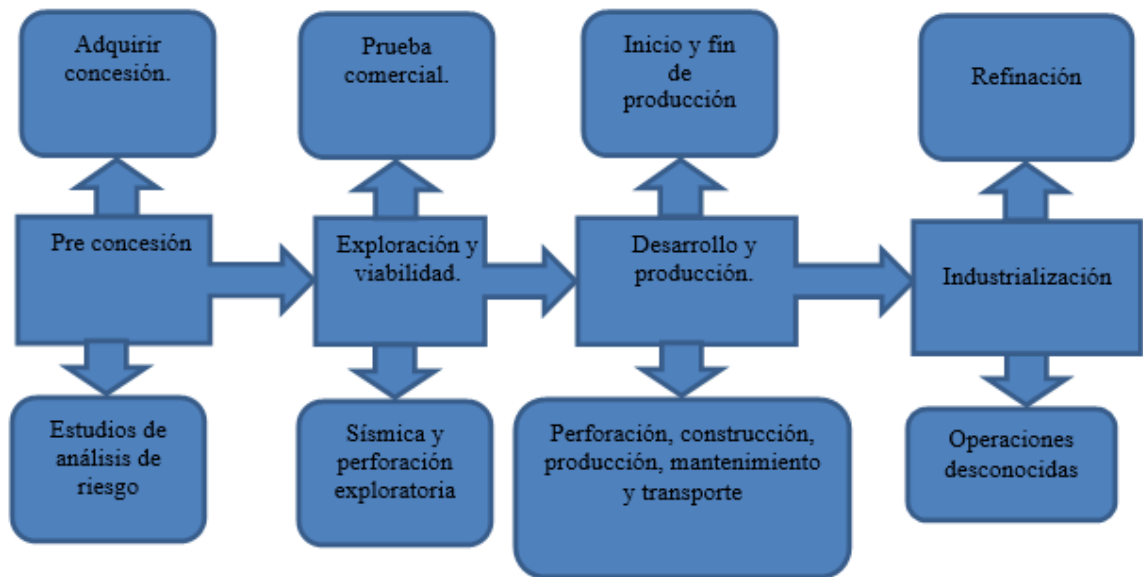
centrado más en la parte de la sísmica ha ido contaminando y acabando con los recursos hídricos a nivel nacional e internacional.

2. DESCRIPCIÓN DE LOS POSIBLES IMPACTOS EN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DE BAJA SALINIDAD CAUSADOS POR LAS ACTIVIDADES DE LA INDUSTRIA PETROLERA

La industria petrolera tiene dimensiones variables y múltiples funciones que se realizan de manera simultánea, por lo que resulta práctico abordar el estudio de la caracterización del impacto a las aguas subterráneas de baja salinidad desde la perspectiva de un campo, ya que la unidad de campo responde a las características naturales del yacimiento donde provienen los hidrocarburos, siendo un poco más fácil explicar por qué las dimensiones son variables, ya que depende de la magnitud del hidrocarburo almacenado en la estructura geológica, y de otra parte, se puede explicar que las actividades que se realizan están asociadas al avance o etapa del proyecto en cuestión.

Las etapas del ciclo de vida de un proyecto petrolero son: exploración, explotación, desarrollo y transporte y desmantelamiento como se aprecia en la figura 11.

Figura 11. Etapas de un ciclo de vida de un proyecto petrolero.



Fuente: Autora

En el diagrama anterior en cada etapa del desarrollo de un campo petrolero se realizan diferentes actividades, éstas son la base o el fundamento de dichas etapas, buscando así optimizar todos los procesos que se llevan a cabo, desde las negociaciones en los predios donde se implantará, hasta, la recuperación de la zona que resulte afectada por las actividades aplicadas.

En la pre-concesión al igual que en la mayoría de todos los proyectos relacionados con recursos del país lo que se busca es obtener una aprobación para la inicialización de los estudios y las pruebas necesarias en las zonas de interés.

Inmediatamente después de obtener dicha aprobación y los permisos necesarios para operar en la zona, se llega a la segunda etapa, donde se buscará determinar la viabilidad del proyecto, las actividades principales en esta etapa son: la sísmica, y si el resultado de ésta es favorable se procederá a realizar perforaciones exploratorias. En este punto del proyecto

se puede establecer si la relación costo beneficio es positiva, ya que de éste análisis dependerá el desarrollo del campo.

La siguiente etapa es la de desarrollo y producción de dicho campo, donde se inicia con la perforación de pozos para producción, se construyen líneas de flujo para el transporte del fluido, en el caso de campos de petróleo son conocidas como oleoductos y para el caso de gas gasoductos.

Lo que se busca en esta etapa es optimizar la producción ofreciendo seguridad a los operadores y a la zona donde se opera. Los beneficios económicos y la estabilidad del proyecto dependen de esta etapa. La etapa del desarrollo y operaciones de producción llega hasta el final de la producción, hasta que se decide abandonar por agotamiento de recursos o por pérdidas económicas.

Luego de esto se procederá a retirar la infraestructura implantada en la zona, esta etapa es conocida como el desmantelamiento y es claro que el impacto se mostrará en su mayor esplendor cuando esta etapa culmina ya que la zona quedará descubierta y se notarán los daños causados.

La presente sección pretende mostrar de la manera más simple las diferentes etapas que comprenden un proyecto petrolero y sus impactos en las aguas subterráneas de baja salinidad.

El desarrollo de un campo petrolero trae implícitas cierto tipo de actividades que son repetitivas en la mayoría de los pozos y en cada uno de los campos. En la industria petrolera éstas se conocen con el nombre de Actividades Típicas. Conforme pasa el tiempo se han podido identificar con claridad estas actividades y también aquellas operaciones que hacen parte

de éstas. Por lo que en este capítulo se pretende describirlas haciendo mención a los posibles impactos a las aguas subterráneas de baja salinidad.

2.1 Sísmica

Sísmica es una palabra que proviene de sismo, que en griego significa temblor. La sísmica es un proceso geofísico de intervención directa sobre el medio ambiente, que consiste en crear temblores artificiales de tierra, mediante la detonación de explosivos a intervalos regulares que causan ondas, con las que se hace una ecografía del subsuelo. Con la información obtenida se producen mapas del subsuelo donde se interpretan las diversas estructuras presentes en el área objeto de estudio, incluidas aquellas que potencialmente pueden almacenar hidrocarburos⁹.

Los geólogos encargados de esta operación trazan un diseño de levantamiento, el cual puede ser equivalente a una extensión de 750 a 1000 km lineales (470 a 625 millas lineales) de línea sísmica o de 2.5 a 5 kilómetros cuadrados (0.9 a 1.8 millas cuadradas) de superficie por cada 100 kilómetros cuadrados (39 millas cuadradas) del área investigada.¹⁰

Comúnmente la exploración comprende estudios geológicos y geofísicos realizados en áreas bastante amplias, a fin de identificar los objetivos favorables para realizar las operaciones respectivas.

Para las explosiones se perforan pozos de entre 2 y 20 metros, sobre una línea recta. El diámetro del hueco es de entre 5 y 10 centímetros.

⁹ Caracterización ambiental de la industria petrolera, Jorge Emilio Calao Ruiz, 2007.

¹⁰ Fomento de la responsabilidad ambiental en operaciones sísmicas, David Gibson, Houston Texas, 2003

Las explosiones se hacen cada 15 y 100 metros. En estos pozos se deposita material explosivo, que se tapa con el material extraído durante la perforación, al detonar el material genera las ondas requeridas. (“Los Impactos Ambientales de la Exploración Petrolera en Ecosistemas Sensibles” Bravo Elizabeth, Mayo, 2007).

Antes de la explosión, se extienden cables que unen todo el sistema de la sísmica y se instalan los geófonos para registrar las ondas que provoca la explosión de las cargas en los pozos. Estas ondas viajan en el subsuelo y se reflejan desde las profundidades de la tierra, al chocar con los diferentes tipos de rocas o estructuras (“CENSAT AGUA VIVA, 2001. Impacto ambiental de la industria petrolera: La Sísmica”).

Si bien se considera que el impacto es transitorio y especialmente estético, los levantamientos sísmicos que no se realizan correctamente pueden producir un impacto ecológico considerable¹¹.

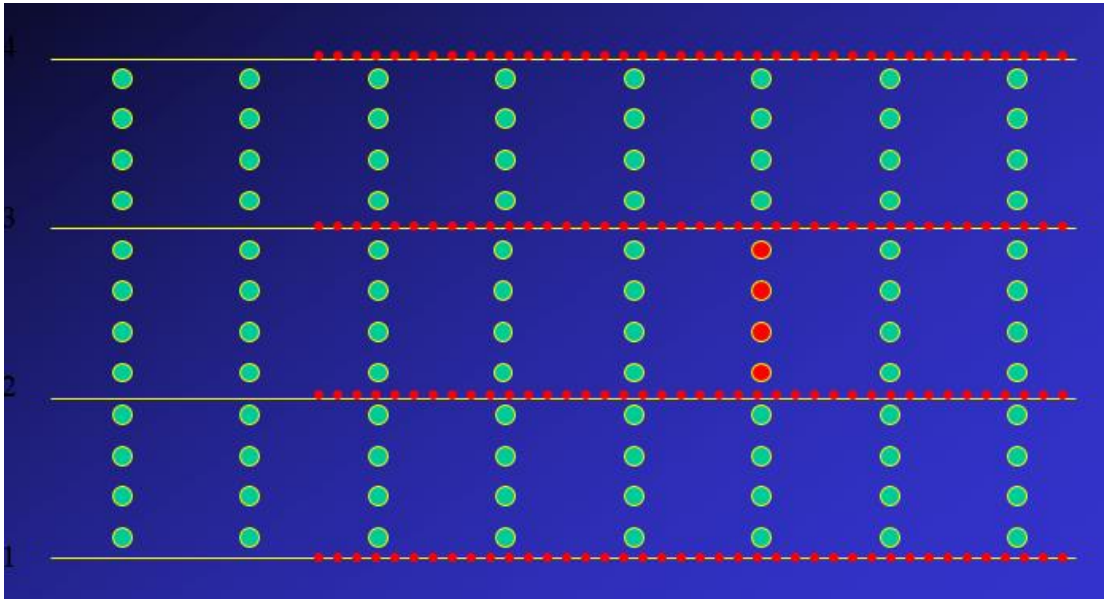
Existen dos tipos de sísmica: 2D Dimensional o 3D Tridimensional.

En principio, un tipo de sísmica se diferencia del otro por la distancia entre las líneas sísmicas o densidad de la malla que es mayor de la sísmica 3D.

Conseguir esa mayor densidad significa que las labores de la sísmica son mucho más intensas y por ello hay mayores impactos en el medio. Se utiliza la sísmica 3D, pues mientras la sísmica 2D aporta información solo en un plano vertical, en 3D entrega muchos más datos. Ver figura 12.

¹¹Fomento de la responsabilidad ambiental en operaciones sísmicas, David Gibson, Houston Texas, 2003

Figura 12. Malla Sísmica 3D.



Fuente: Tomado de la presentación de Charla de Impactos ambientales Ing. Oscar Vanegas.

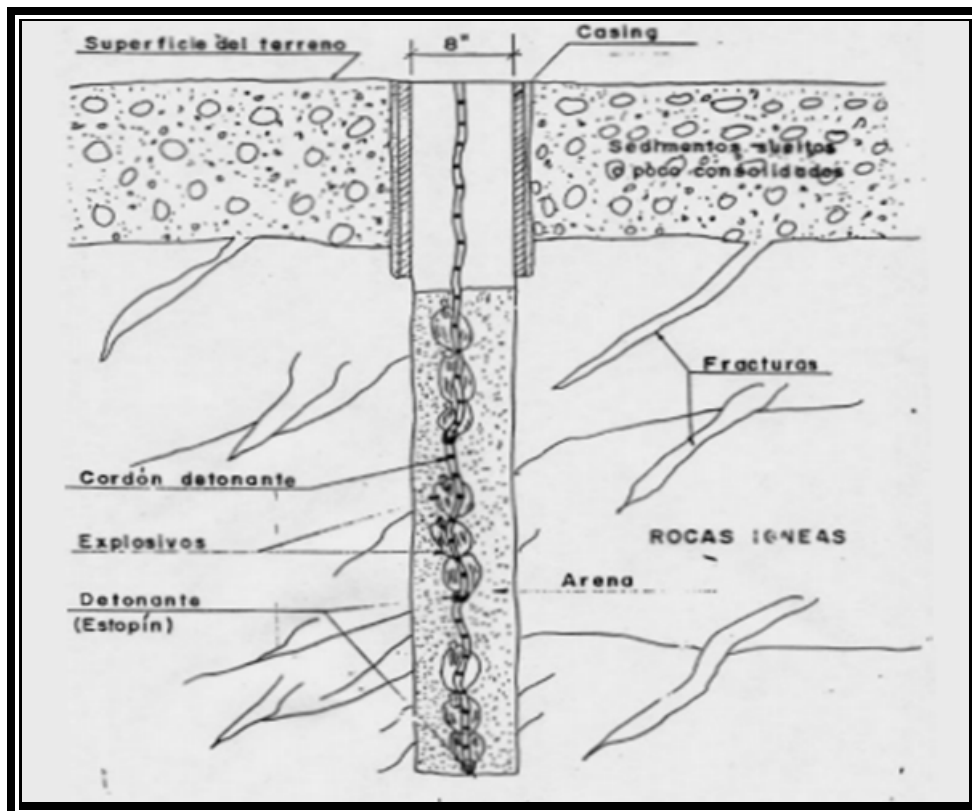
Sin embargo la sismica en 3D es menos favorable para el medio ambiente incluyendo las aguas subterráneas debido a que la perforación de los huecos para introducir las cargas explosivas se hace entre distancias más cortas.

Debido a esto se dice que el área afectada va a ser mayor, y además, teniendo en cuenta que la carga explosiva supera en algunas ocasiones los 15 kilogramos de explosivos, lo que desencadenara en un daño al subsuelo, y trayendo consigo otros impactos secundarios ¹².

¹² NATIONAL ENVIROMENTAL RESEARCH INSTITUTE; Guidelines to Environmental impact Assessment of Seismic Activities in Greenland Waters 2nd edition, New York USA 2010.

Y por otro lado, la dinámica subterránea del agua cambia, (ésta dinámica hace referencia a la parte del ciclo hidrológico que tiene lugar en el subsuelo), debido a la detonación de explosivos que podrían causar rupturas o fragmentar el suelo, provocando cambios en el flujo subterráneo¹³. Ver figura 13. Y generando una serie de fracturas en forma radial que afectan la roca. Como se aprecia en la figura 14.

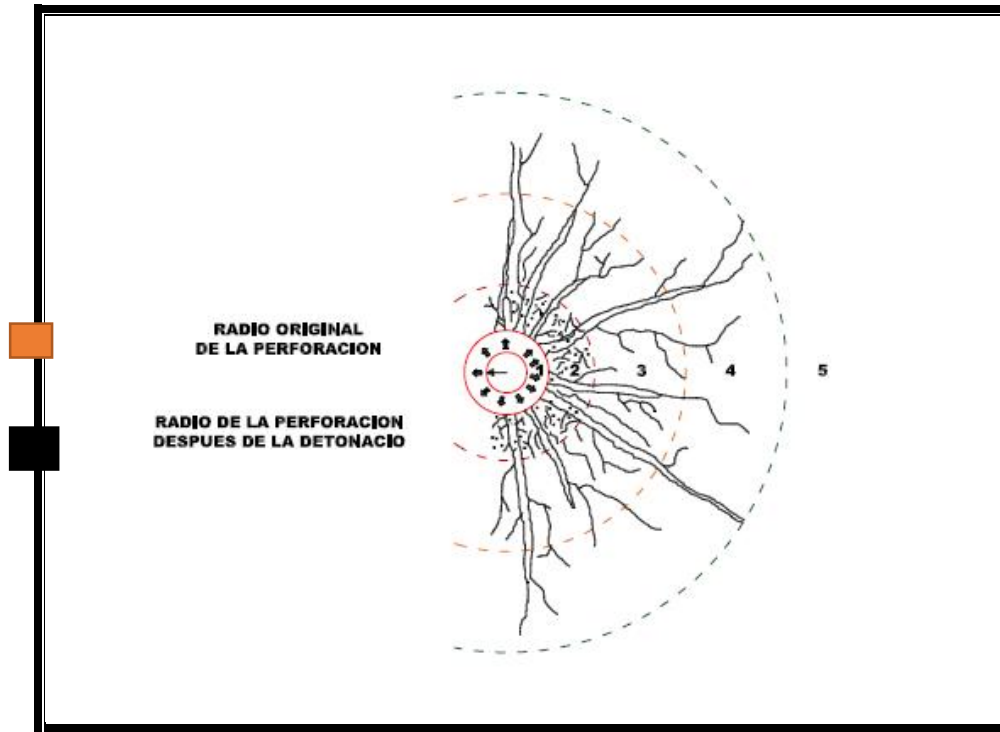
Figura 13. Representación interna de un pozo con carga explosiva en su interior.



Fuente: Metroagua S.A estudio hidrológico, barrios la Paz y Cristo Rey de Gaira Santa Marta, 2007.

¹³Descripción y evaluación de impactos asociados a la prospección sísmica, Consultora Ambiental Domus, prospección sísmica en el lote 76, volumen 4, capítulo 3, 2008.

Figura 14. Radios de perforación antes y después de la detonación.



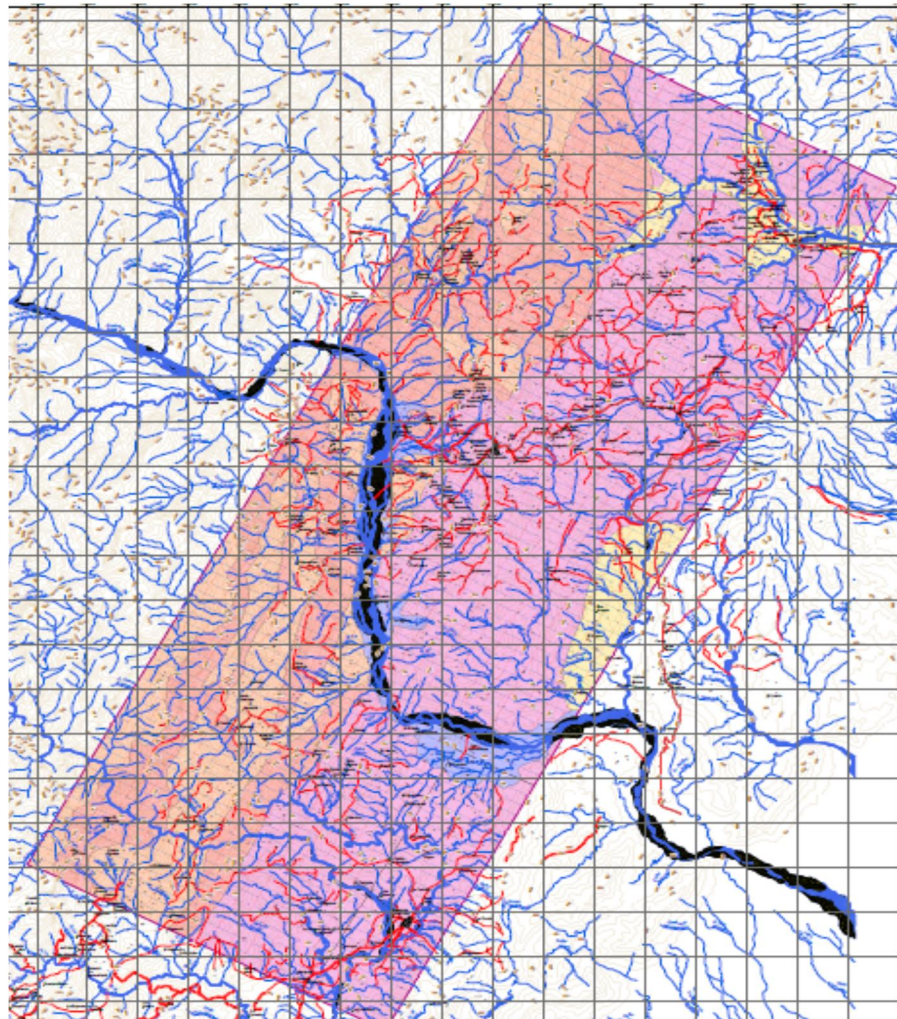
Fuente: Study of Potential Impacts of Seismic on Drinking Water Resources, Wray, 2008.

Al final se podría evidenciar una posible contaminación, con la desaparición y el cambio de rumbo de las aguas subterráneas; todo debido a que no hay una buena hidrogeología (inventarios de puntos de aguas, aljibes y manantiales) hecha antes de iniciar el proyecto de sísmica.

Algunos casos en la geografía nacional están en el piedemonte llanero en los proyectos Niscota y Odisea, en la zona según estudios realizados se encuentran presentes 178 nacederos de agua para Niscota y 238 nacederos en el caso de Odisea¹⁴; como se observan en las figura 15. (Estudio realizado para Niscota).

¹⁴Grupo consultor EIATEC Ltda, proyecto Niscota y Odisea, año 2010.

Figura 15. Mapa de cuerpos de agua presentes en la zona, proyecto Niscota.



UNIDAD DE COBERTURA	ÁREA (Ha)	ÁREA (%)
Bosques de galería	17932,69	26
Bosque secundario	2216,62	3
Rastrojo alto	19870,15	29
Tierras agropecuarias en rotación	25313,07	37
Suelos expuestos	2042,16	3

Fuente: Grupo consultor EIATEC Ltda., estudio sísmico Niscota y Odisea, año 2010.

2.2 Perforación

La perforación es un proceso que consiste en realizar en el subsuelo un hueco vertical, inclinado u horizontal, para alcanzar profundidades que van en promedio de 3 a 6 kilómetros de extensión con el objetivo de llegar a sitios conocidos como formaciones posiblemente productoras que pueden tener hidrocarburos (crudo, gas, condensados o una mezcla de estos) produciendo un tipo de desechos llamados cortes de perforación¹⁵.

Los impactos ambientales de esta fase son: deforestación, erosión, ruido, pérdida de biodiversidad, creación de estancamiento de aguas y represas, contaminación de las aguas de los ríos, lagunas y esteros con desechos químicos, crudo y desechos domésticos de los campamentos; filtración de tóxicos a través del suelo y por consiguiente contaminación de aguas freáticas o del subsuelo, poniendo en peligro a las napas de agua dulce y a las aguas superficiales vecinas¹⁶.

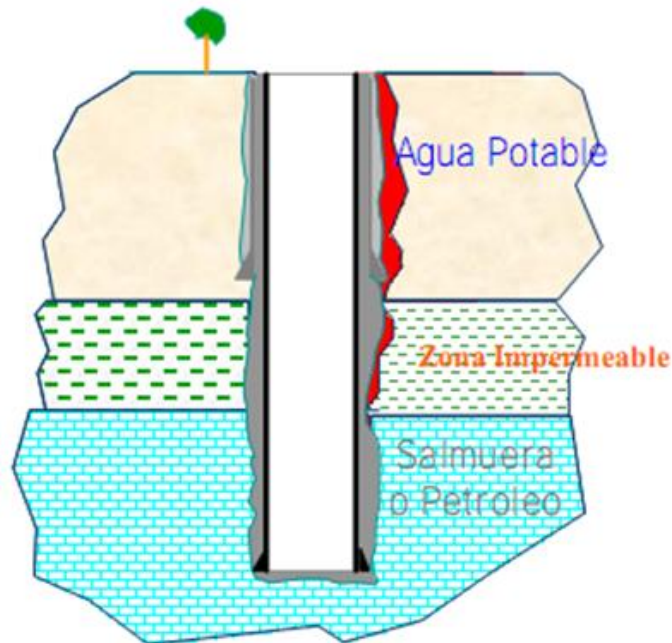
Una evidencia de esto se observa durante la cementación primaria se hace la introducción de un material cementante, el espacio anular entre revestidor y hoyo, se realiza con el objetivo de: aislar zonas, soportar las cargas axiales de los revestidores a ser corridos posteriormente, proveer soporte y protección al revestidor, y proteger el hueco¹⁷. Ver figura 16.

¹⁵ Oil Watch, Manual De Monitoreo Ambiental Para La Industria Petrolera.

¹⁶ Los Impactos Ambientales de la Exploración Petrolera en Ecosistemas Sensibles Bravo Elizabeth, Mayo, 2007

¹⁷ Caracterización ambiental de la industria petrolera, Jorge Calao Ruiz, Universidad Nacional de Medellín, 2007.

Figura 16. Cementación primaria de un pozo.



Fuente: <https://www.google.com.co/urlimágenescementaciónprimaria>

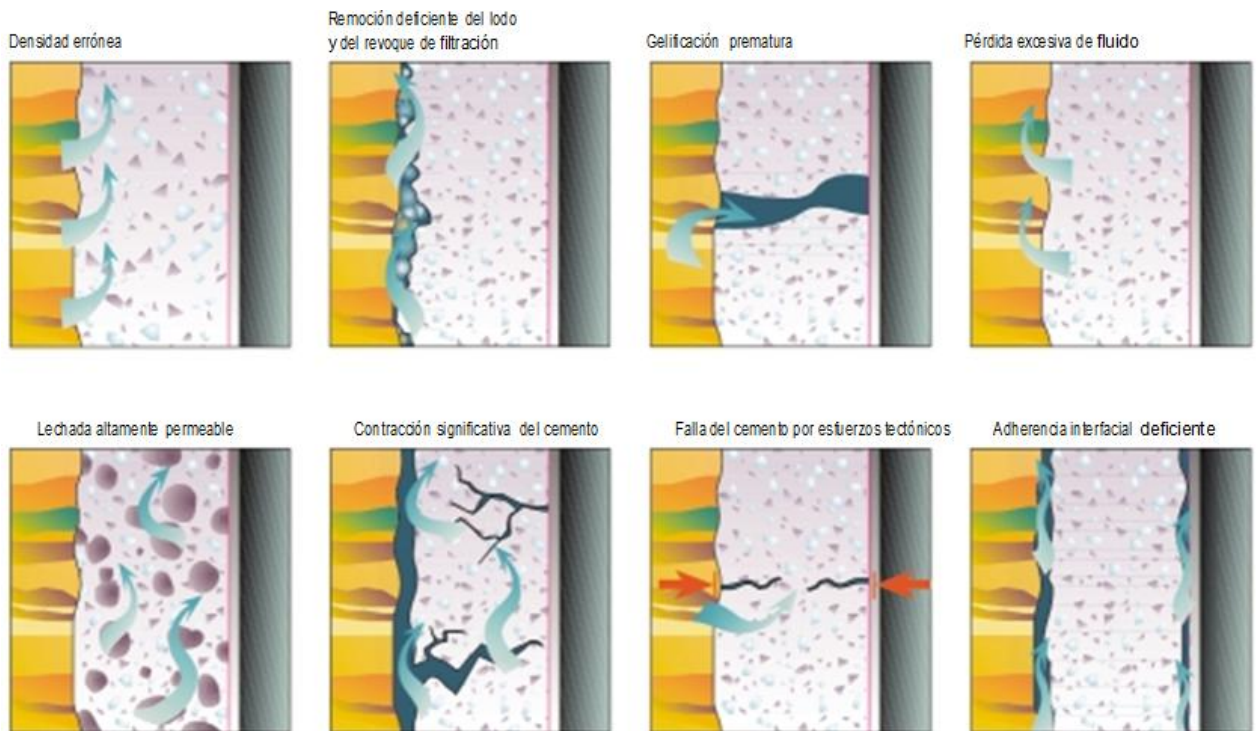
Sin embargo hay varios parámetros que afectan el sellado durante la cementación que son:

- La densidad incorrecta del cemento pueda dar lugar a un desequilibrio hidrostático.
- La eliminación deficiente del lodo y del revoque de filtración (enjarre) permite que el gas fluya hacia arriba por el espacio anular.
- La gelificación prematura conlleva la pérdida de control de la presión hidrostática.
- La pérdida excesiva de fluido permite que ingrese gas en la columna de la lechada.

- Las lechadas altamente permeables conducen a un aislamiento de la formación deficiente y a una baja resistencia a un flujo de gas.
- La contracción significativa del cemento, y la falla del cemento bajo esfuerzos tectónicos, crean fracturas y microanillos que permiten la migración de fluidos.
- La adherencia deficiente en la interfaz entre el cemento y la tubería de revestimiento o entre el cemento y la formación también pueden ocasionar fallas.

Esto se observa en la figura 17.

Figura 17. Parámetros que afectan el sellado durante la cementación.



Fuente: El principio del fin. Ian Barclay. Jan Pe. Ilenbarg, Frans Tettero; Petroleum Development Oman LLC Muscatt, Sulfanato de Oman, Primavera 2002.

Debido a lo anterior, es la importancia de utilizar una excelente calidad del cemento, durante décadas los ingenieros de petróleos han confirmado que los cementos Clase A son óptimos, duraderos y se encuentran disponibles en cualquier parte y relativamente son económicos.

Si se tiene una mala cementación, esto conlleva a una mala canalización que puede acarrear a la incompatibilidad de los pre-flujos o mala remoción de lodos; existe la posibilidad de una mala centralización de la tubería; y también se pueden presentar zonas lavadas lo que conlleva a un régimen de flujo incorrecto, todo esto generando una contaminación directa de acuíferos, aguas subterráneas, aljibes y todos los cuerpos de agua presentes cerca de dichas perforaciones¹⁸.

Una evidencia de este problema es un caso quizás de los más largos y controvertidos de América Latina donde Ecuador demandó a la empresa Texaco hoy Chevron por la suma de 19 mil millones de dólares por la contaminación del Lago Agrio¹⁹.

2.3 Producción

La etapa de producción consiste en la explotación de los hidrocarburos (petróleo y gas) que se encuentra en el yacimiento. La producción trae consigo un gran montaje de infraestructura en la zona establecida, pues la seguridad y la eficacia de la producción dependen de un grado alto de esta. Los componentes en superficie para la puesta en marcha de un pozo son principalmente:

¹⁸ El principio del fin. Ian Barclay. Jan Pe.Ilenbarg, Frans Tettero; Petroleum Development Oman LLC Muscatt, Sulfanato de Oman, Primavera 2002

¹⁹ Ponce, Alexis y Gallardo, Mauricio. 2003. Hoy Ecuador hace historia en el juicio contra la Texaco. Brevísima crónica del "JUICIO DEL SIGLO". Martes 21 de Octubre de 2003. APDH del Ecuador.

- Separadores
- Tanques
- Planta de tratamiento de gas
- Planta de tratamiento del agua
- Piscinas de recolección
- Líneas de despacho o ductos.

Durante esta etapa quizás se presentan la mayor parte de contaminación de las aguas subterráneas, debido a que hay dos factores que influyen de manera considerable, uno es la presencia de flujos cruzados en el yacimiento, y el segundo es el hidrodinamismo, sin embargo existen otras causas que conllevan a generar más impactos como lo son el fracturamiento hidráulico y la explotación del *Shale gas*.

Cuando se hace referencia a los flujos cruzados del yacimiento petrolífero se habla de las fracturas que ha tenido dicho yacimiento formadas bajo distintas condiciones geológicas, razón por la cual, sus características son únicas e irrepetibles²⁰.

Esta caracterización está dirigida a determinar la dirección preferencial de las fracturas, así como los sectores del yacimiento en los cuales están más desarrolladas y hay mayor cantidad. Dichos patrones de flujo se pueden caracterizar como flujos cruzados o desinhibido: que es cuando la porosidad responde al gradiente de presión del fluido es decir que las fracturas poseen buena comunicación con la matriz. Y en el caso contrario se dice que es un flujo cruzado o inhibido²¹.

²⁰Navarro A. Environmentally safe drilling practices, Cap.8

²¹Disponible en <http://yacimientosdepetróleo.lacomunidadpetrolera.com/2009/06/caracterizaciondelosyacimientos>

La mala caracterización de dichas fracturas y la posibilidad de incrementar dichas fracturas ha hecho que el crudo migre y termine contaminando los acuíferos, “La vereda más contaminada de Acacias, Guamal, Humadea y Castilla”, eso es La Esmeralda para los pobladores. Primero vivieron la contaminación que les dejó la entrada del bloque petrolero Cubarral, cuando se contaminaron cerca de 38 jagüeyes o pozos profundos que tiene cada casa para surtirse de agua”²².

Una prueba a esta teoría se observa en la figura 18. Donde la líder Marta Liliana Chivatá, concede entrevistas a medios locales y nacionales presentando evidencias de este impacto²³.

Figura 18. Miembro de la comunidad, con evidencias a causa del impacto ambiental.

²²Tomado del artículo de prensa, publicado el 17 de Agosto de 2013 por el periódico El Conuco, el poder de la información en la Orinoquia, Natalia Herrera Durán de El Espectador.

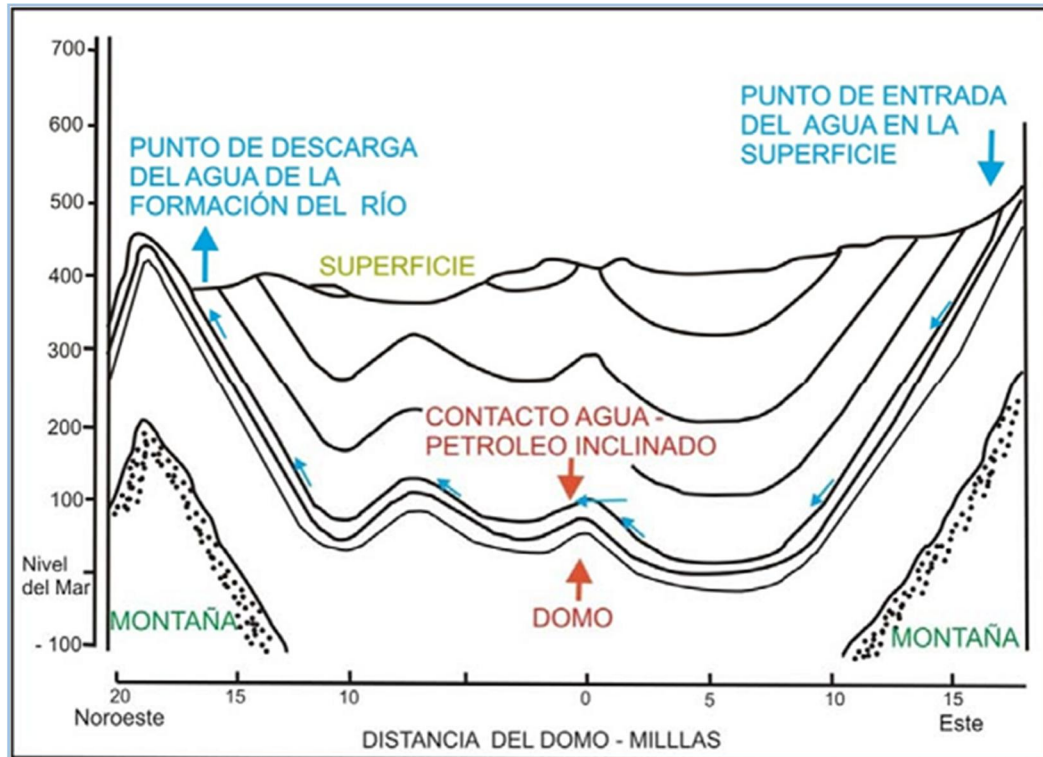
²³Tomado del periódico El Espectador, publicado el 22 de Agosto de 2013, Natalia Herrera Durán



Fuente: Tomado del periódico El Conuco, el poder de la información en la Orinoquía, Informe de Natalia Durán de El Espectador, sábado 17 de agosto 2013.

Por otra parte el hidrodinamismo mencionado anteriormente, Es el hecho en el cual los yacimientos se recargan de fuentes de agua en superficie, por eso la presión de los yacimientos se mantiene constante. Para comprender dicha teoría tenemos la figura 19 un modelo de trampa geológica.

Figura 19. Modelo de trampa geológica.



Fuente: Modificada, geología del petróleo básica 1999.

En un sistema con flujo de agua subterránea en una cuenca sedimentaria se puede reconocer básicamente tres zonas con características particulares. Una zona en donde ocurre la entrada de agua llamada Zona de Recarga, caracterizada por estar generalmente a mayor altura con respecto a las otras zonas y por cuya razón posee los valores de energía potencial más altos. La zona de recarga puede encontrarse a nivel superficial, concordando con ríos, lagos u otras fuentes de agua menos continuas (precipitaciones).

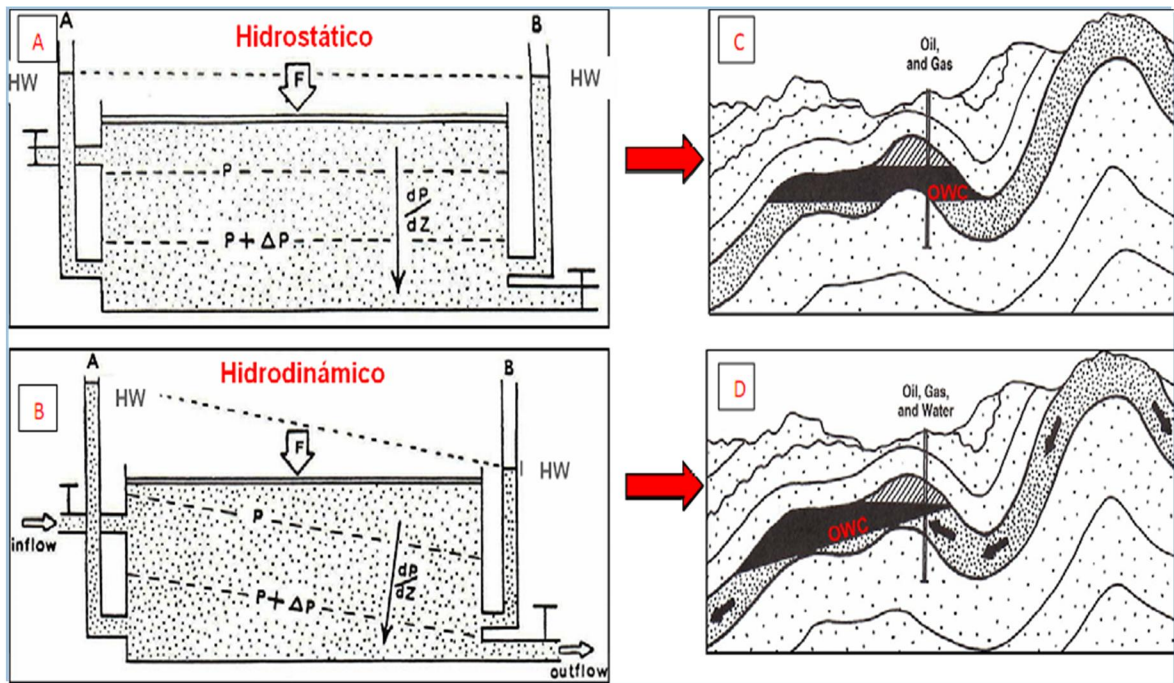
Una segunda zona en un sistema de flujo de agua subterránea es la Zona de Circulación, en donde la energía potencial inicial con la que entra el agua decrece a medida que ésta efectúa su movimiento a través de los caminos más apropiados, entre los más comunes seguidos por el agua durante su

movimiento subterráneo se tienen: las estructuras ramificadas de poros, fracturas, fallas y discordancias²⁴.

La tercera Zona es la de Descarga, lugar donde ocurre la expulsión o el retorno del agua que ingreso al sistema, de nuevo a la superficie pero en un sitio topográficamente más bajo que el de entrada o de recarga.

Y se debe tener en cuenta los modelos hidrostáticos e hidrodinámicos como se aprecia en la figura 20.

Figura 20. Modelos de recipientes cerrados de los entornos hidrostático (A) e hidrodinámico, (B), mostrando gradiente de presión, y carga hidráulica, y los efectos sobre la acumulación de petróleo y gas en condiciones hidrostática e hidrodinámica D.



Fuente: Modificado Dahlberg, Eric, 1994.

²⁴Evaluación e identificación de los factores geológicos que controlan el hidrodinamismo en un campo, Cordero Carolina, Moncada Andrés, Universidad Industrial de Santander 2011.

Algunas de las características más importantes del ambiente hidrodinámico son²⁵:

1. Los fluidos se desplazan dentro de la unidad.
2. Los gradientes de presión no están orientados verticalmente debido a efectos que no son sólo de la densidad y la gravedad.
3. Los planos de presión constante (planos isopresión) no son horizontales, son inclinados hacia abajo en la dirección del flujo.
4. Los niveles de carga hidráulica varían de un lugar a otro dentro del yacimiento.
5. El nivel de energía potencial varía dentro del yacimiento, disminuyendo en la dirección del movimiento del fluido.
6. Los contactos entre las diferentes fases de fluido no son horizontales, son inclinados en el sentido del flujo o disminución de energía potencial.

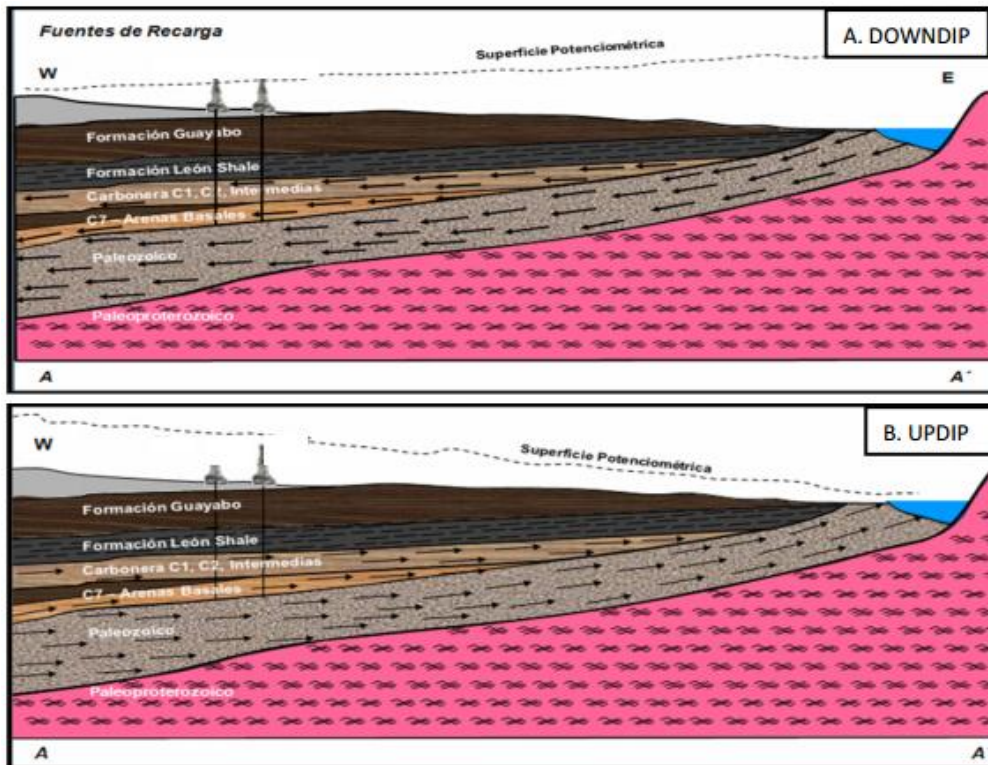
En el año 2011 Ecopetrol hizo un estudio a través del ICP con la escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander donde los tesisistas fueron Carolina Cordero y Andrés Moncada, en éste se encontró que la recarga del yacimiento de Rubiales es el río Rubiales²⁶.

²⁵DAHLBERG, E. Applied Hydrodynamics Petroleum Exploration. 1994

²⁶Evaluación e identificación de los factores geológicos que controlan el hidrodinamismo en un campo, Cordero Carolina, Moncada Andrés, Universidad Industrial de Santander

1. Considerando el Rio Guaviare como recarga percolando las unidades del Oligoceno - Mioceno Medio (Formación Carbonera), Paleozoico y otras unidades arenosas, con C7 pinchándose; esto sería en dirección downdip lo que favorecería el entrapamiento. Este se puede apreciar mejor en la Figura que representaría este modelo en 3D.
2. Otro planteamiento considera el Rio Guaviare como descarga, lo que Representaría una dirección updip, lo cual no sería beneficio para el campo.

Figura 21. Modelos de dirección de flujo. Las posibles rutas del hidrodinamismo serían las unidades del Paleozoico, el cual se pone en contacto con las unidades de la Formación Carbonera, el León Shale y Guayabo.



Fuente: Modelamiento Estático Y Dinámico. Zona de Estudio. Ecopetrol, ICP. 2011.

Según la investigación realizada en la tesis, en Rubiales se produce cuatro millones de barriles de agua diaria, también tenemos Castilla y Chichimene que están produciendo alrededor de dos millones y Caño Limón cerca de 3 millones de barriles de agua.

“Lo que daría un total 10 millones de barriles de agua en solo estos 3 campos y si se sumara la producción diaria de agua en los Llanos Orientales se afirmarí que esta por el orden de los 15 millones diarios de barriles de agua, y esto es lo que demuestra que muchos ríos en los Llanos Orientales se están secando y que el rio Cusiana era navegable en el paso Cusiana y hoy ese río se puede cruzar piedra por piedra sin mojarse los zapatos”²⁷

²⁷ Tomado de la entrevista realizada al Ing. Oscar Vanegas por el periódico El Conuco, año 2103, sobre el Hidrodinamismo en la cuenca de los Llanos Orientales.

Ver figuras 22-26.

Figura 22. Río Cusiana antes de la industria petrolera.



Fuente: Tomado de la presentación de Hidrodinamismo Ing. Oscar Vanegas foto de Germán Solano.

Figura 23. Río Cusiana hoy en invierno.



Fuente: Tomado de la presentación de Hidrodinamismo Ing. Oscar Vanegas
foto de Germán Solano.

Figura 24. Río Cusiana hoy en verano.



Fuente: Tomado de la presentación de Hidrodinamismo Ing. Oscar Vanegas
foto de Germán Solano.

Figura 25. Río Cusiana hoy en verano después de una fuerte lluvia.



Fuente: Tomado de la presentación de Hidrodinamismo Ing. Oscar Vanegas
foto de Germán Solano.

Figura 26. Río Cusiana hoy en verano



Fuente: Tomado de la presentación de Hidrodinamismo Ing. Oscar Vanegas foto de Germán Solano.

Otros posibles impactos generados con el hidrodinamismo son:

- Afectación de manantiales
- Disminución de flujo base
- Afectación de humedales (desaparición, contaminación)
- Afectación de vegetación
- Contaminación
- Intrusión de agua salada.

Continuando con la explicación de los posibles impactos generados en la producción, cuando el yacimiento comienza a declinar es necesario, implementar el uso de tecnología nueva, o ya existente que pretenda mejorar el factor de recobro y/o aumentar la producción del campo; existen varios

métodos utilizados pero se hará referencia a un caso: el fracturamiento hidráulico.

Esta es una técnica de estimulación donde se inyecta un fluido a una presión tal que provoque la ruptura de la roca, creando fracturas.

En los yacimientos de Tight sandstones y shales, debido a las bajas porosidades y permeabilidades, se emplea la técnica para optimizar la producción. Se crean nuevos canales (o se conectan unos ya existentes) para aumentar la tasa de flujo del pozo.²⁸

La EPA²⁹ junto con los diversos expertos plantea seis posibles escenarios de contaminación de los recursos de agua potable subterránea durante una operación de fracturamiento hidráulico.

Lawrence Berkeley National Laboratory, en coordinación con la EPA, está utilizando simulaciones numéricas para investigar los seis mecanismos posibles que podrían dar lugar a la migración de los fluidos desde un yacimiento de Shale gas, y de las condiciones en que tales escenarios hipotéticos pueden ser posibles³⁰.

Estos posibles mecanismos son:

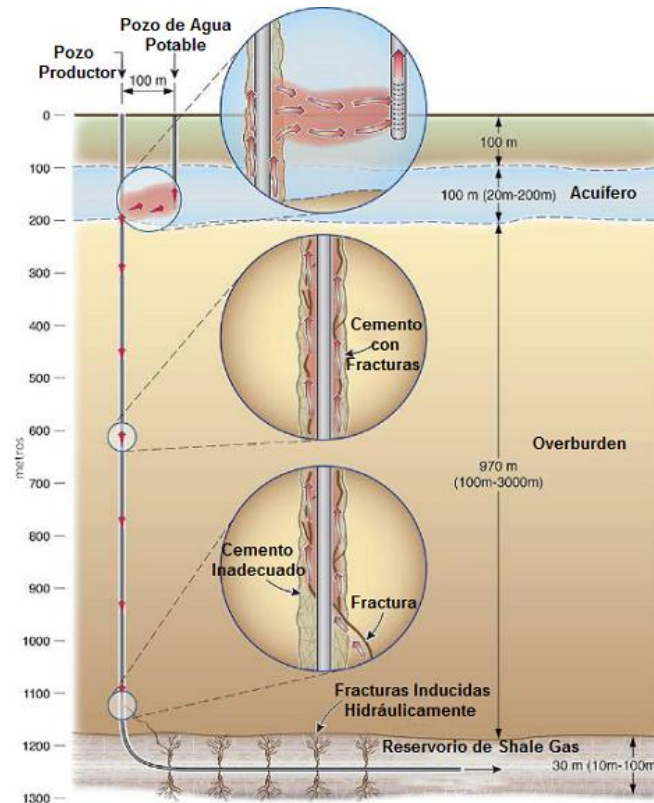
²⁸ efectos ambientales del Shale gas Jennifer Sofía Vesga Duarte; UIS, 2013.

²⁹ Environmental protection agency

³⁰ Eye of Potential Impacts of Hydraulic Fracturing on Drinking Water Resources, EPA, 2012.

Escenario 1: Este escenario simula una vía de migración hipotética que se produce cuando un pozo de producción sufre daño durante una presión excesiva en las operaciones de fracturamiento hidráulico. Una vía de migración se genera a través del cemento o área cerca al pozo, por donde los fluidos pueden viajar hasta llegar a los acuíferos (figura 27).

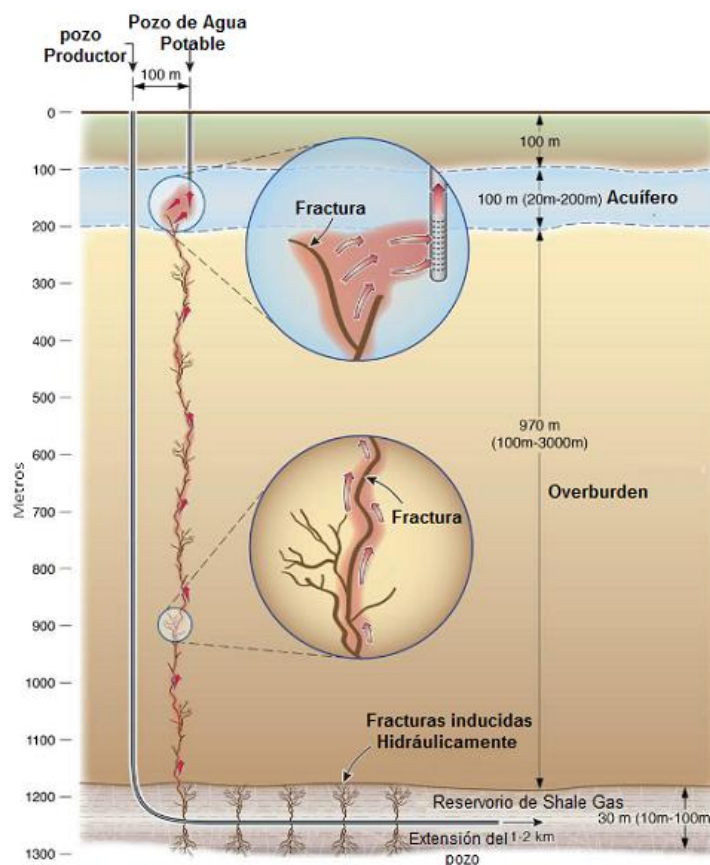
Figura 27. Esquema de la hipotética contaminación del acuífero debido a daño en la cementación del pozo por sobrepresión.



Modificado de: Study of Potential Impacts of Hydraulic Fracturing on Drinking Water Resources, EPA, 2012

Escenario 2: Este escenario simula un diseño inadecuado de las operaciones de fracturamiento hidráulico dando como resultado fracturas que permiten la comunicación entre el yacimiento de shale gas y el acuífero. Indirectamente una forma de comunicarse se produciría si las fracturas se interceptaran con una formación permeable entre la formación de shale gas y el acuífero (figura 28).

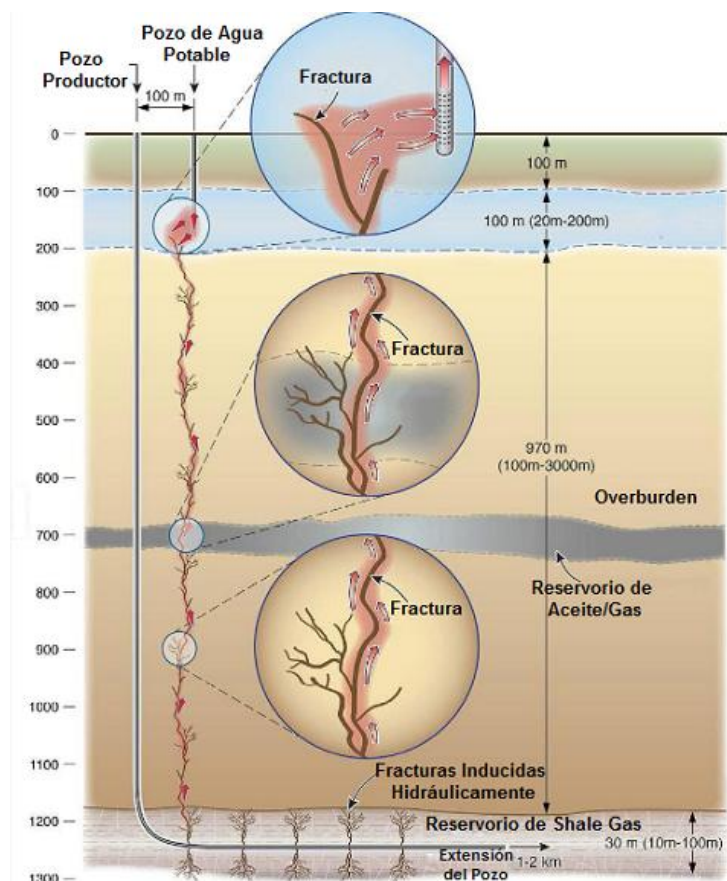
Figura 28. Esquema de la hipotética contaminación del acuífero debido a fracturas generadas en el overburden por el fracturamiento hidráulico.



Modificado de: Study of Potential Impacts of Hydraulic Fracturing on Drinking Water Resources, EPA, 2012

Escenario 3: Al igual que el escenario 2, se puede generar fracturas en el overburden interceptando yacimientos convencionales de hidrocarburos que se encuentra entre el reservorio de shale gas y el agua subterránea, creando así una doble fuente de contaminación para el acuífero (figura 29).

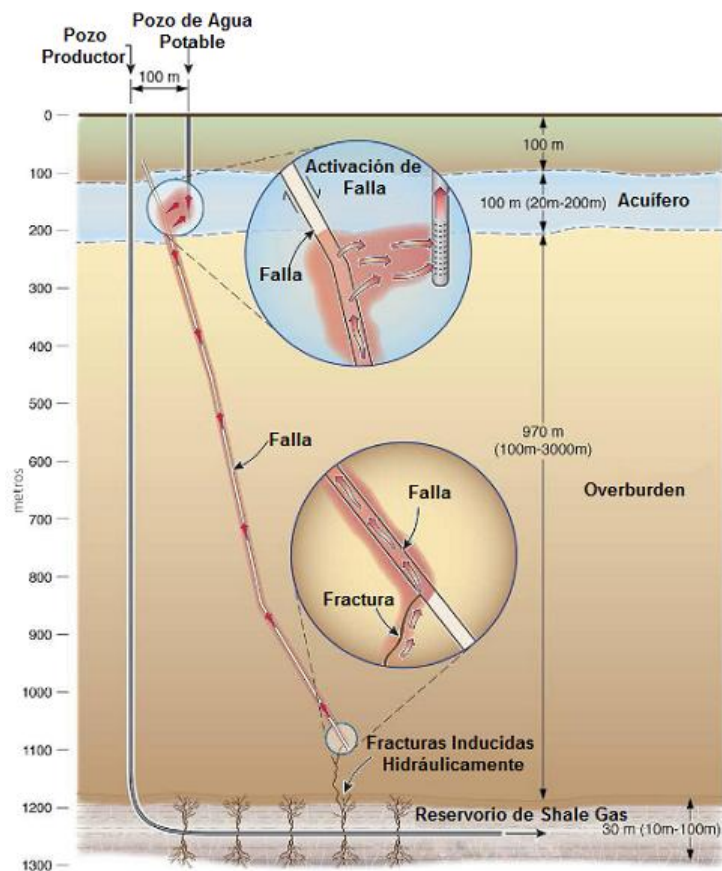
Figura 29. Esquema de la hipotética contaminación del acuífero debido a fracturas generadas en el overburden por el fracturamiento hidráulico que interceptan un yacimiento convencional de aceite/gas



Modificado de: Study of Potential Impacts of Hydraulic Fracturing on Drinking Water Resources, EPA, 2012

Escenario 4: este escenario hipotético simula la migración de los hidrocarburos y otros contaminantes desde las fracturas inducidas que salen de la zona de interés y que se interceptan con fracturas selladas o fallas inactivas las cuales se activan por las operaciones de fracturamiento hidráulico llegando así a los recursos de agua subterránea (figura 30).

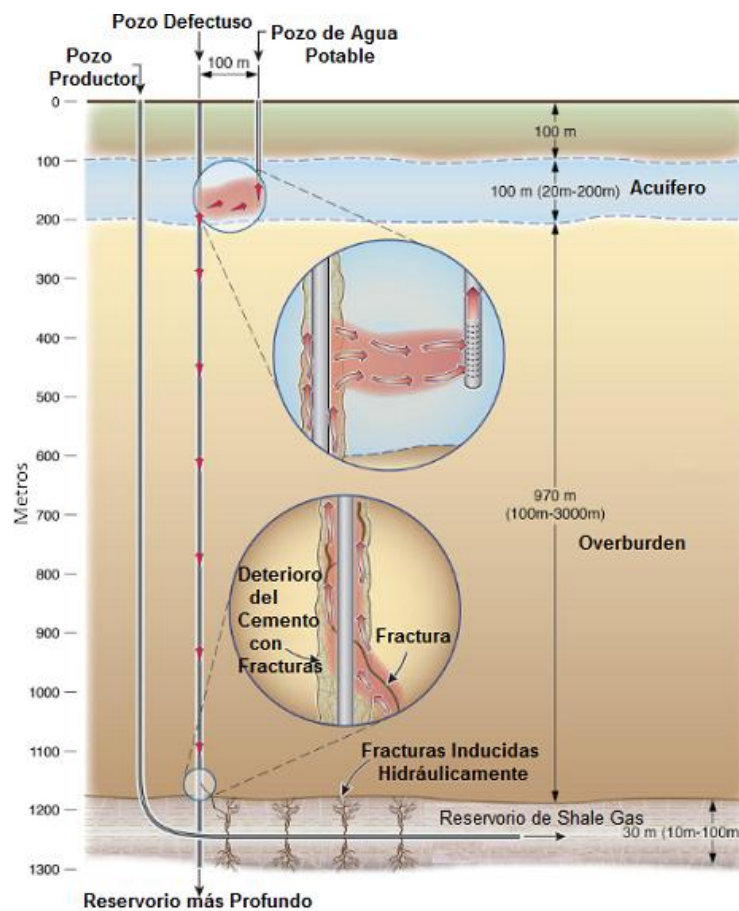
Figura 30. Esquema de la hipotética contaminación del acuífero debido a fracturas generadas en el overburden por el fracturamiento hidráulico que interceptan fallas selladas o inactivas.



Modificado de: Study of Potential Impacts of Hydraulic Fracturing on Drinking Water Resources, EPA, 2012

Escenario 5: este escenario hipotético simula la migración del fluido desde las fracturas inducidas por el fracturamiento hidráulico, las cuales se interceptan con pozos de hidrocarburos convencionales vecinos que poseen una cementación deteriorada o completamientos inadecuados y que pueden crear vías de acceso de contaminantes hasta los acuíferos (figura 31).

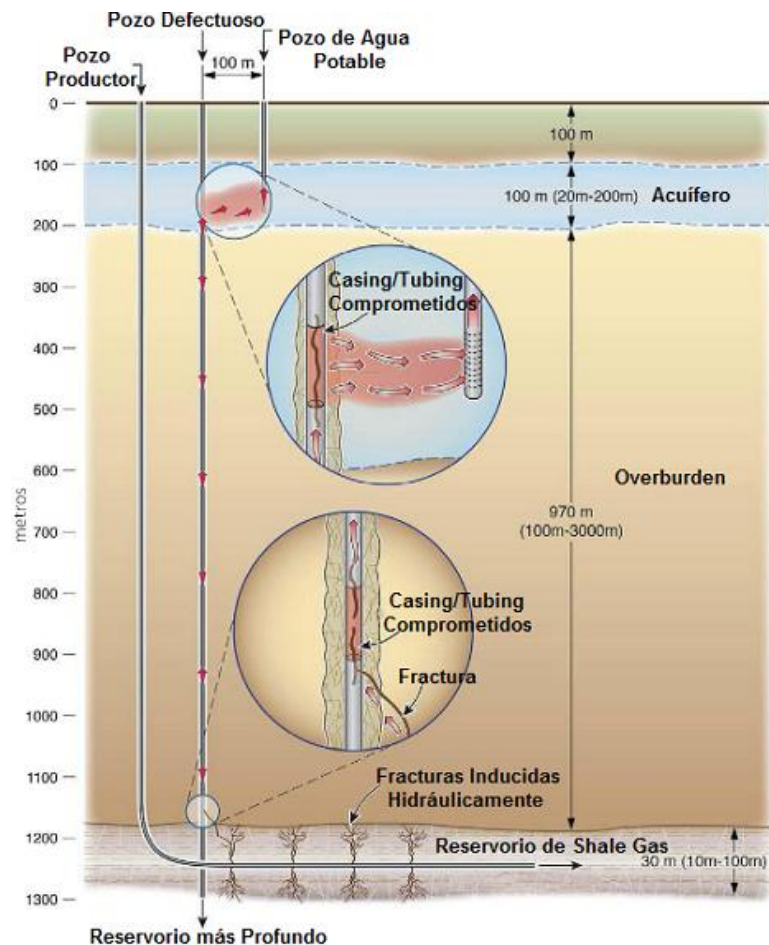
Figura 31. Esquema de la hipotética contaminación del acuífero debido a fracturas generadas en el overburden por el fracturamiento hidráulico, las cuales interceptan otros pozos convencionales de aceite/gas deteriorados y comunican después al acuífero.



Modificado de: Study of Potential Impacts of Hydraulic Fracturing on Drinking Water Resources, EPA, 2012.

Escenario 6: este escenario simula como los fluidos migran a través de las fracturas inducidas que interceptan pozos cercanos de hidrocarburos convencionales mal terminados, con casing y tubing comprometidos que proporcionan una baja resistencia a la migración del fluido y que lo conecta con el acuífero (figura 32).

Figura 32. Esquema de la hipotética contaminación del acuífero debido a fracturas generadas en el overburden por el fracturamiento, las cuales interceptan otros pozos convencionales de aceite/gas que son incorrectamente cerrados y comunica después al acuífero.



Modificado de: Study of Potential Impacts of Hydraulic Fracturing on Drinking Water Resources, EPA, 2012.

Uno de los problema más significativos durante la extracción de petróleo, es el agua salobre presente en los yacimientos petroleros, y que sale a la superficie asociada con el crudo. Es conocida también como agua de formación, y representa uno de los problemas que con mayor dificultad enfrenta la industria petrolera (Hill, 2000). Ver figura 33.

En algunas operaciones petroleras, el agua de formación es tratada en tres piscinas abiertas colocadas en tres niveles descendentes, donde el agua llega mediante tuberías, bajo el presupuesto que en cada piscina las partículas de sal son retenidas por decantación. Con frecuencia se forman piscinas artificiales junto a las piscinas de formación, con altos contenidos de petróleo ³¹.

Una vez purificada el agua sale al ambiente pues es vertida a cuerpos de agua aledaños. Sin embargo, es fácil observar que el agua de ríos y esteros cercanos a las piscinas de agua contienen importantes cantidades de hidrocarburos. Es fácil encontrar atrás de las estaciones petroleras pantanos creados por el vertimiento de las aguas de formación ³².

³¹ CENSAT AGUA VIVA, 2001. "*Impacto ambiental de la industria petrolera: 3.- Las aguas de producción*".

³² Los Impactos Ambientales de la Exploración Petrolera en Ecosistemas Sensibles Bravo Elizabeth, Mayo, 2007, pag.16

Figura 33. Reinyección de aguas residuales



Fuente: Tomado de la presentación de Impactos Ambientales del Ing. Oscar Vanegas.

Estos desechos pueden infiltrarse en el suelo subterráneo. El agua de lluvia entra en la piscina, se mezcla con los desechos tóxicos y se desborda por las paredes de piscinas. Otra forma de tratar las aguas asociadas es el confinamiento o reinyección³³

Esta puede ser inyección anular, en la que el agua se inyecta en la parte anular de los pozos (entre la tubería de revestimiento y la tubería de producción). El fluido se vierte en la primera zona permeable, debajo de la tubería de revestimiento, cercana a la superficie.

³³ CENSAT AGUA VIVA, 2001. "Impacto ambiental de la industria petrolera: 3.- Las aguas de producción".

Puede ser hecha también por evaporación, utilizada especialmente en zonas áridas, donde se presenta una elevada transpiración que supera la precipitación. En estas zonas, el agua de producción se deposita en hoyos para ser evaporadas, contaminándose las fuentes y corrientes de agua subterráneas³⁴

La reinyección en pozos pone en riesgo de contaminación a los acuíferos, sobre todo cuando los pozos de reinyección no llegan al mismo estrato del que se extrajo el crudo, o la distancia de acuíferos es menor de 10 Km. A pesar de ser más segura que las tecnologías descritas anteriormente, no es totalmente confiable porque:

1. formaciones no tienen la capacidad de albergar toda el agua que necesita confinarse.
2. Estas formaciones pueden tener sellos lutíticos y arcillosos de baja permeabilidad pero volumétrica y estructuralmente discontinuos y con fallas.
3. Como resultado de lo anterior, puede darse migración del agua hacia estratos superiores, lo que contaminaría los acuíferos subsuperficiales y hasta superficiales.

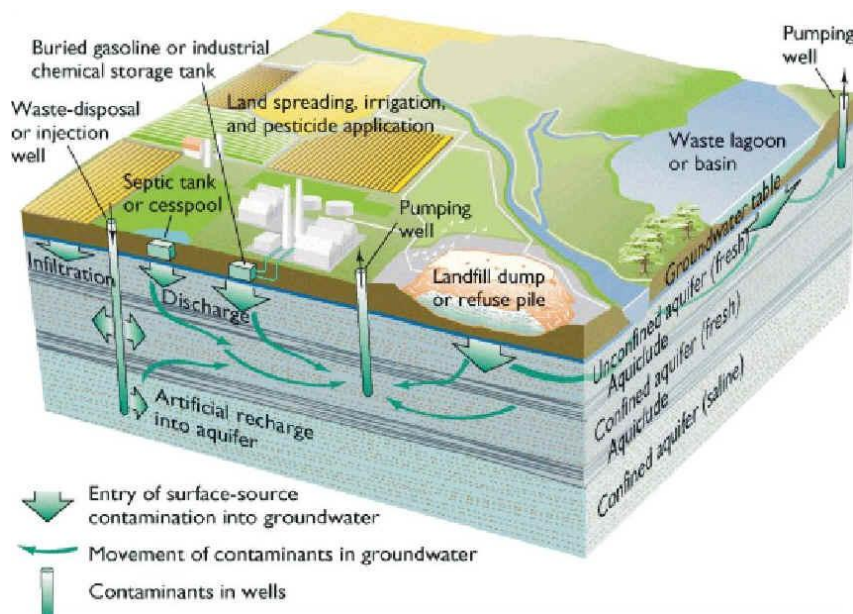
Otro problema es que las aguas de formación son corrosivas, produciendo daños en los tanques, filtros y líneas de flujo utilizados en su tratamiento. Debido a esto, los sistemas de reinyección colapsan.

³⁴ Descripción y evaluación de impactos asociados a la prospección sísmica, Consultora Ambiental Domus, prospección sísmica en el lote 76, volumen 4, capítulo 3, 2008.

Las aguas de formación pueden entrar al medio ambiente cuando se producen derrames por rotura de las líneas que las transporta, por desbordamiento o goteo de los tanques donde se almacenan o accidentes en los pozos reinyectores. Ver figura 34.

Adicionalmente, el agua de formación es utilizada en la recuperación secundaria. El agua es reinyectada a la formación productora en el pie acuífero para un recobro adicional de petróleo del yacimiento debido al mantenimiento de la presión.

Figura 34. Contaminación de las aguas subterráneas.



Fuente: tomado del medio electrónico http://www.whymap.org/whymap/EN/Home/gw_world_g

2.4 Transporte

El crudo extraído de los pozos petroleros, es transportado por oleoductos a una infraestructura central donde es tratado (por ejemplo se separa el agua y gas del crudo), y luego este crudo se transporta a una estructura central para su exportación. El agua de formación y el gas son transportados por líneas de flujo³⁵.

Miles de kilómetros están atravesados por oleoductos y líneas de flujo en zonas de explotación petrolera. Los oleoductos y líneas de flujo pueden estar enterradas o están tendidos en la superficie y son una fuente constante de contaminación, ya sea por rupturas accidentales o por goteo rutinario debido al envejecimiento de la tubería. Ver figura 35.

Figura 35. Construcción de zanjas para la instalación de los oleoductos.

³⁵ Reyes y Ajamil, 2005b. Prevención y Mitigación de impactos ambientales



Fuente: Tomada de la presentación de la asignatura Gestión Integral en Hidrocarburos del Ing. Harving Díaz Consuegra.

Sin embargo un posible impacto en esta etapa, se presenta cuando se abren las zanjas para enterrar los oleoductos debido a que en algunos casos se coloca una geomembrana, la cual hará el papel de malla protectora para evitar que el agua quede estancada, trayendo consigo una futura corrosión la tubería.

2.5 EJEMPLOS DE IMPACTOS EN AGUAS SUBTERRÁNEAS A NIVEL MUNDIAL

2.5.1 Indonesia

En Indonesia la compañía petrolera Caltex (consorcio Texaco - Chevron) afectaron el ecosistema de bosques húmedos de los pueblos de Sakai, Laut, Talang Mamak, Bonai, Sakai, Hutan y Akit. Son en total 4.747 familias y 35.682 personas.

Caltex tiene una importante presencia en la provincia de Riau, en Sumatra y es la mayor empresa petrolera en el país. Extrae un 1'500.000 barriles diarios, lo que representa el 60% de la producción nacional. Al momento Caltex opera cuatro bloques en Riau es la operadora de 600 pozos petroleros en el Centro y Este de Sumatra.

En la perforación, se genera grandes cantidades de agua de formación, que contiene una mezcla compleja de aguas subterráneas con materiales líquidos sólidos, incluyendo crudo, fluidos de perforación, químicos de perforación y materiales geológicos. Las aguas de formación pueden contener cantidades peligrosas de compuestos orgánicos (hidrocarburos) e inorgánicos (trazas de metales pesados) de naturaleza tóxica³⁶

El agua de formación es descargada a piscinas, estas se encargan de separar el agua de los hidrocarburos. Se produce una estratificación del crudo superficial y las aguas de formación. El agua es vertida entonces al medio ambiente sin ningún otro tratamiento.³⁷

³⁶ Bisnis Indonesia, 9 Septiembre 2003, "Caltex kurangi karyawan hingga 26 %"

³⁷ Kompas, 7 Marzo 2001; Caltex Mengontrak Pengamanan Swasta International

Las piscinas no tienen ningún tipo de recubrimiento para prevenir la infiltración de los contaminantes.

Los derrames ocurridos en la operación petrolera, procedentes de los pozos y el oleoducto, es una de las principales rutas por las cuales el crudo entra a formar parte de los cuerpos de agua en la zona, lo que puede conducir además a contaminación del suelo e infiltración a los cuerpos de agua subterránea. Ver figura 36.

Figura 36. Bosques Húmedos de Sakai.



Fuente: https://www.google.com.co/url?Incendios_petroteros_de_Sakai

2.5.2 Colombia

En Colombia la empresa Occidental afecto la Laguna del Lipa en los pueblos de Guahibos (Incluye a los Sikvani, Betoyes, Macahuanes, Hitanu, Dome Jiwi), Salivay campesinos de Arauca.

El contrato con Occidental abarcó un área de 5 millones de hectáreas; la empresa se asentó principalmente en la Laguna de Lipa, gran santuario y centro de importancia cultural y espiritual de los pueblos Guahibos, Macahuanes, Betoyes y pueblos indígenas vecinos y cubre una superficie de 100.000 hectáreas. Junto a ella una extensión de 715.000 hectáreas de bosque tropical perteneciente a la reserva forestal y ecológica del Sarare.³⁸

El Oleoducto Caño Limón Coveñas comprende una longitud de 780 kilómetros. Oxy tuvo un agresivo proceso de ocupación de los territorios, construyó carreteras, diques, muros de contención, puentes, campamentos, etc. y provocó la alteración total de los sistemas naturales de drenaje, afectando las economías locales de campesinos e indígenas, de agricultura y pesca. La vía Saravena - Arauca se construyó como un dique por la falta de drenajes. Debido a las características del crudo liviano se presenta una fuerte contaminación de hidrocarburos aromáticos carcinogénicos (Benceno, Xileno).³⁹ Ver figura 37.

Figura 37. Consecuencias en la Laguna La Lipa.

³⁸ Avellaneda, Alfonso. 1998. Petróleo, colonización y medio ambiente en Colombia, Ecoediciones. Bogotá.

Colombia

³⁹ Miller, Brad. 2004. Plan Colombia: Crónica de un desastre anunciado. Earth Island Journal. Otoño de 2004, volumen 19, número 3. <http://www.redbetances.com/articulo.php?id=246>



Fuente: <https://www.google.com.co/searchq=laguna+la+lipa>

Para la construcción de 1000 Km. de oleoducto, se arrasaron fincas de pequeños campesinos y zonas de bosques naturales; el oleoducto se convirtió en sitio de sabotajes, lo que provocó una permanente contaminación en su ruta (más de 654 casos provocando 2,1 millones de barriles derramados). La contaminación es rutinaria, accidental y provocada. Occidental ha vertido a los ecosistemas araucanos más de 5 mil millones de barriles de agua de formación⁴⁰

Se expropiaron las tierras a los campesinos y además, la empresa provocó que la cultura Guahiba haya sido desmembrada espiritualmente y que las comunidades se encuentren en acelerado proceso de aniquilamiento físico y cultural.

⁴⁰ Oilwatch, Chevron Mano derecha del Imperio, 2005.

Los Guahibo incluyen a los Sikuni, Betoyes, Macahuanes, Hitanu y Dome Jiwi. Tras 25 años de actividad petrolera los Macahuanes perdieron el 75% de su territorio y los Hitanu y los Dome Jiwi el 95% de su territorio. El pueblo Guahibo está hoy sumido en el alcoholismo, la prostitución, las enfermedades y la desnutrición, perdieron la caza, la pesca y la recolección⁴¹.

Occidental ejerció diferentes tipos de influencia y provocó un debilitamiento de la legislación de conservación al haber logrado sacar un permiso de operación en un área de reserva.

Occidental ejerció todas sus influencias para eliminar el estatus de santuario de fauna y flora al área donde iba hacer el desarrollo petrolero para así no tener ningún impedimento legal. La actividad petrolera en Arauca determinó un incremento de la violencia, convirtiéndola en una de las zonas más conflictivas del país⁴²

2.5.3 Estados Unidos

Un hecho más reciente de este tipo de impacto es en Estados Unidos de Norteamérica, en el área de Dallas, Texas, Mitchell Energy utilizó el fracturamiento hidráulico para abrir y producir el Shale Gas de Barnett. Uno de los mayores impactos reportados en esta área relacionados con la perforación de pozos de gas es la disminución de la calidad del aire. Los resultados iniciales del estudio de la calidad del aire de TCEQ dentro y alrededor del Shale de Barnett encontraron cantidades elevadas de benceno.

⁴¹ Roldán, Roque. 1995. "aproximación histórica a la explotación de petróleo en territorios indígenas". Tierra profanada: Grandes Proyectos en Territorios Indígenas de Colombia. Disloque editores. Bogotá.

⁴² Avellaneda, Alfonso. 1998. Petróleo, colonización y medio ambiente en Colombia, Ecoediciones. Bogotá. Colombia

En agosto de 2010 la EPA publicó los segundos resultados de la investigación sobre el potencial de contaminación del agua subterránea en el área de Pavillion, Wyoming

Las conclusiones señalaron que hay evidencia de contaminación de las aguas subterráneas en el área con elevados contenidos de metales, compuestos orgánicos e hidrocarburos de petróleo, además de metano. Hubo cambio en el olor y el sabor del agua potable luego de haber iniciado trabajos de fracturamiento hidráulico en la zona (Shale gas)⁴³.

La EPA estableció una nueva investigación en diciembre de 2011 con el objetivo de determinar si la contaminación de las aguas subterráneas en el área de Pavillion, era el resultado de las operaciones de perforación y producción de gas natural en sus alrededores. Ver figura 38.

Figura 38. Contaminación en EUA por el Shale gas.



Fuente: FUENTE:<http://splashdownpa.blogspot.com/2009/08/update-cause-of-cow-deaths-in-caddo.html>

⁴³ Tomado del medio electrónico: <http://www.epa.gov/region8/superfund/wy/pavillion>

En el reporte de la EPA se concluye que el estudio que inició por las quejas de los ciudadanos, determinó que se detectaron altas concentraciones de bencenos, xilenos, orgánicos en el rango de la gasolina y orgánicos en el rango del diésel sobre las muestras de agua subterráneas.

2.5.4 Ecuador

La empresa estadounidense Texaco, ahora Chevron, inició la exploración de petróleo en la provincia de Sucumbíos en la Amazonia Ecuatoriana, en un área de 5 millones de acres de selva húmeda tropical amazónica. La empresa encontró crudo provocando un auge petrolero que atrajo otras compañías como Chevron, Amoco y Grace, y con ellos la ampliación de las áreas de exploración y explotación en esa región del país⁴⁴.

Lago Agrio produjo 1,7 billones de barriles de petróleo junto a una estela de daños ambientales en toda la región, se vertieron 16 mil millones de galones de agua de formación en los complejos sistemas hídricos, según datos de la misma empresa; aproximadamente 4 millones de galones diarios.

Y no solamente esto también se hizo malas cementaciones y el no mantenimiento de dichos pozos y líneas de tuberías lo que provoco una contaminación en las aguas superficiales y por supuesto dicho estancamiento término afectando las aguas subterráneas⁴⁵. Véase figura 39.

44 OINCE. 1998. El mejor lugar de la selva. Ñotssia Tsampi jin'ttima isu. Edit. Abya Yala. Quito

45 Oilwatch. "La manera Occidental de extraer petróleo". 2001. Quito. Ecuador

Figura 39. Impactos en Ecuador Lago Agrio.



Fuente: <https://www.google.com.co/> impactos-secoya-amazonia-bosques-peligro

3. NUEVAS ALTERNATIVAS PARA MITIGAR IMPACTOS DE LA INDUSTRIA PETROLERA EN LAS AGUAS DE BAJA SALINIDAD.

En este capítulo se presenta una recopilación de las nuevas tecnologías ambientales disponibles para la prevención y mitigación de los impactos ambientales causados por la industria petrolera.

La base de una nueva industria petrolera limpia y amigable con el medio que la rodea está basada en la implementación de tecnologías ambientales de punta en las diferentes etapas de los proyectos.

Es un reto para las petroleras mundiales infundir un nuevo criterio de visualización hacia ellas por parte del mundo entero, sostenido por bases fuertes y sólidas de desarrollo sustentable. Hoy día la industria es vista como una de las mayores fuentes de contaminación en el mundo ya que los principales problemas ambientales están relacionados con la afectación que ésta le causa al medio.

Este nuevo concepto de industria petrolera solo es posible si se establece una interacción entre ella y el medio ambiente, la cual arroje resultados positivos para ambas partes, aproximándose así a ese desarrollo sostenible del cual se habla tanto es estos días. Dichos planteamientos solo serán posibles si se diseñan nuevos mecanismos de aprovechamiento del recurso, en el cual se tengan en cuenta los diversos ecosistemas que componen las zonas intervenidas, para ello es necesario acoger tecnologías vanguardistas que optimicen todos o la mayoría de los procesos que se realizan en este proyecto.

A continuación se describen algunas nuevas tecnologías ambientales disponibles que puedan ayudar a la industria a realizar prácticas con el mínimo impacto sobre el medio ambiente.

3.1. Sísmica

Aunque la exploración petrolera ha tenido consecuencias significativas para el medio ambiente en el pasado, las técnicas y las prácticas se han modificado para reducir al mínimo el daño asociado a la operación sísmica.

Es recomendable en este caso tener en cuenta ciertos aspectos antes de llevar a cabo dichas actividades de sísmica para así minimizar los impactos, entre estos aspectos se destacan: época del año, regulaciones, exploración, culturas presentes, flora, fauna, respuesta de emergencia y operaciones.

Una vez que estos aspectos son tenidos en cuenta en un sistema de gestión ambiental, la compañía puede proceder con la actividad sísmica, cerciorándose de minimizar el impacto. Las trochas para la realización de la línea sísmica deben ser realizadas a mano con machetes y ganchos preferiblemente, a una anchura de no mayor a 1.5 m. Los topógrafos encargados de la actividad deben reducir al máximo la cantidad de vegetación cortada, y las afectaciones al terreno.

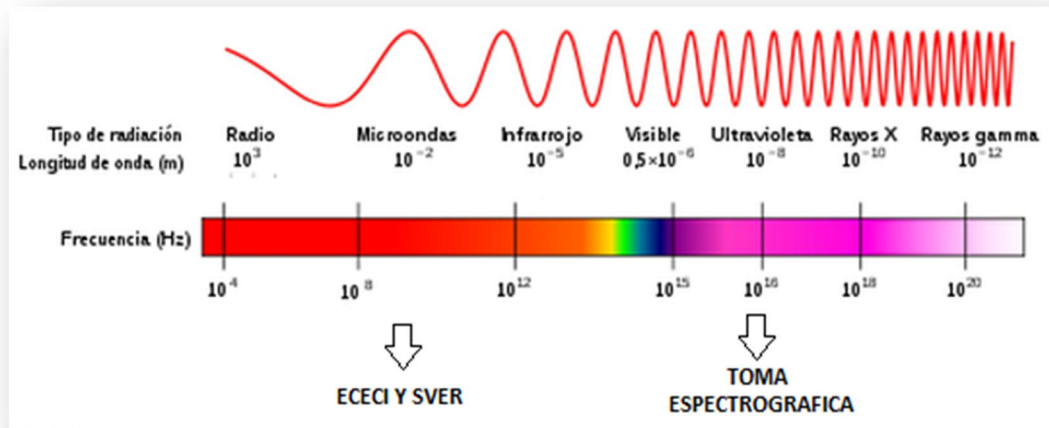
Los avances tecnológicos en la exploración sísmica pueden ayudar a reducir las consecuencias para el medio ambiente y los costos económicos de este tipo de operaciones.

Actualmente se cuenta con una nueva tecnología, las pruebas sísmicas en 4D, aumentan la exactitud y las ventajas económicas y aún más las ambientales. Este tipo de sísmica actualmente disponible en el mercado

internacional como nacional se conoce como Tecnología OFT “oil & gas finder technology” desarrollada en 1979 en Rusia para exploración y prospección de reservas de petróleo y gas.

La metodología compuesta consta de un procesamiento de imágenes obtenidas a través del satélite (sensores remotos) más un establecimiento de campos electromagnéticos de corto impulso (ECECI) y un sondeo vertical de electro-resonancia (SVER). Como se puede apreciar en la figura 40.

Figura 40. Tecnología OFT



PASO 1

- 1- Imagen dentro del espectro electromagnético
- 2- Detecta anomalías tipificadas de gas y petróleo.

PASO 2 y 3

- 1- Establecimiento de Campos Electromagnéticos de Corto Impulso
- 2 -Sondeo Vertical de Electro-Resonancia
- 3- Detalla en campo las anomalías de GAS y Petróleo

Fuente: <http://diariodeunexplorador.wordpress.com/2009/11/06/apuntes-de-fisica-teorias->

Esta tecnología trae consigo muchos beneficios entre algunos de ellos se tiene:

- Tiempo de entrega de resultados Imagen Satelital 15 días, trabajo de campo entre 45 a 60 días, incluido procesamiento de los 3 pasos.
- El error máximo es de 1 m. en profundidad, dependiendo el ejercicio técnico.
- Reduce costos en proyectos sísmicos 2D/3D hasta en un 50 %.
- Genera impactos ambientales mínimo, No requiere licencia ambiental, No genera deforestación, no se maneja perforaciones, explosivos ni detonaciones.
- Tecnología comprobada con resultados exitosos.
- Equipo portátil en campo y de trabajo técnicamente especializado.
- Reduce costos logísticos en cuadrilla de campo.

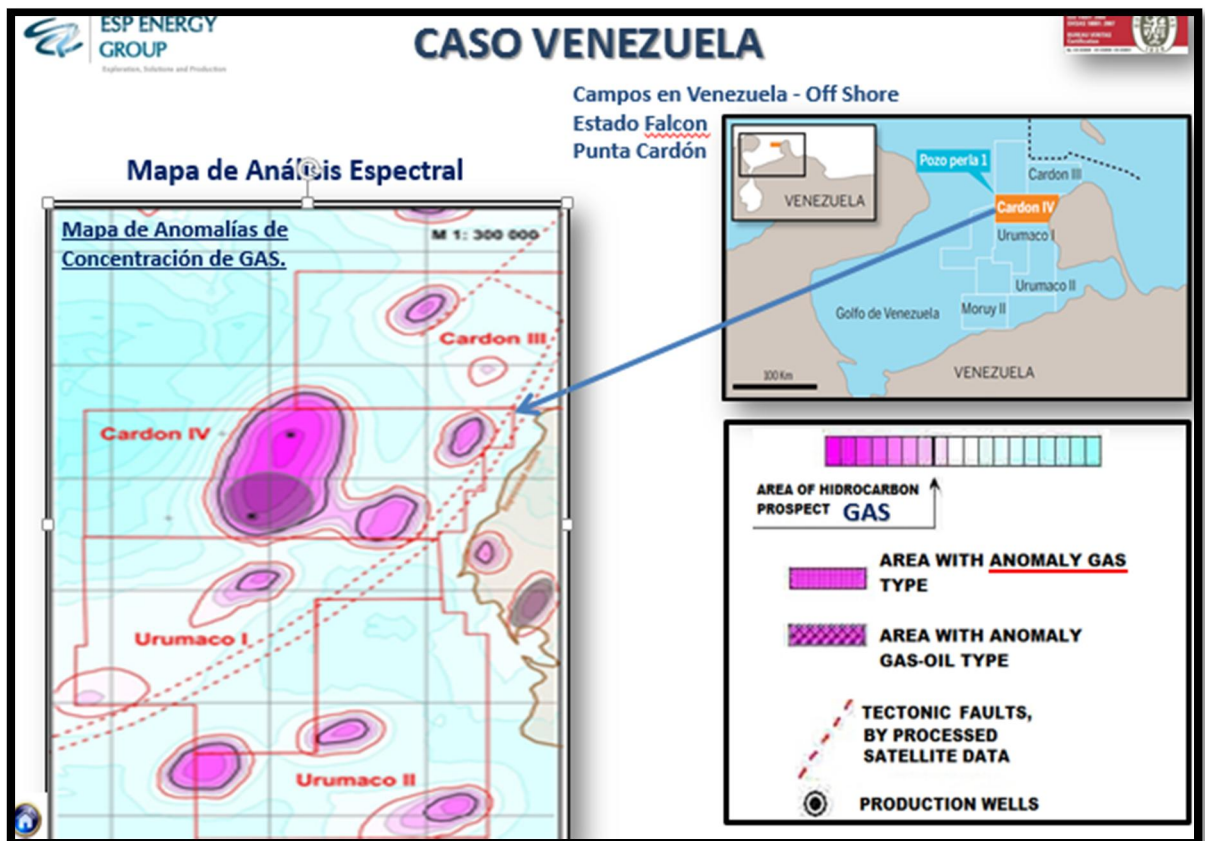
Algunas características de esta nueva tecnología de sísmica son:

- Ideal para hidrocarburos Convencionales y No Convencionales, en yacimientos On Shore y Off Shore.
- Determina profundidad y espesor de las zonas de acumulación de hidrocarburos.
- Define intervalos de hidrocarburos y contactos crudo-agua y gas-crudo.
- Profundidad de evaluación hasta 30,000 pies.
- Determinar las coordenadas en superficie y fondo de pozos a perforar.
- Es una aplicación de tecnología eficiente para determinar la presencia de hidrocarburos a prospectar y delimitar el trazado de adquisición sísmica de detalle 2D/3D en el área de estudio.

La sísmica en Colombia es aún muy experimental pues lamentablemente se utilizan métodos ambiguos para realizarla, pues no las empresas operadoras no son responsables con el manejo adecuado de las zonas que les asignan para intervenir, sin embargo a mitad del presente año las licencias ambientales se están retrasando más de lo normal para los inversionistas debido a que el Ministerio de Ambiente está ejerciendo más control sobre ellas.

Pero en algunas partes de Venezuela incluso de Colombia también se ha aplicado esta tecnología por ejemplo: véase figura 41.

Figura 41. Mapa de análisis espectral en Venezuela.

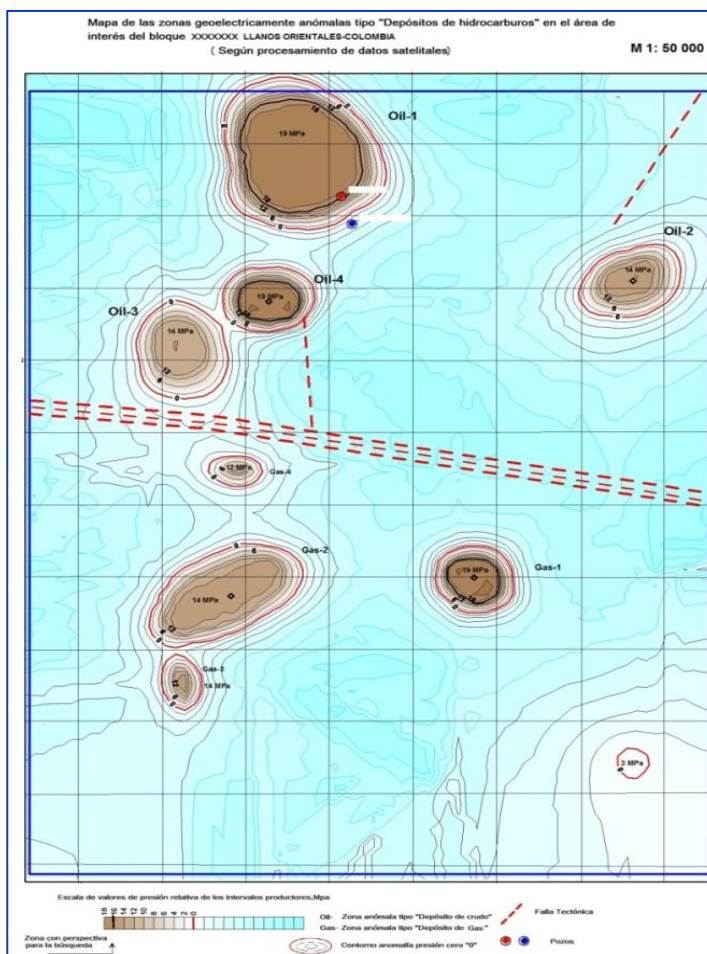


Fuente: http://www.repsol.com/es_es/corporacion/prensa/notas-de-prensa/ultimas_notas/descubrimiento-venezuela.aspx

En este campo se descubrió cuantos pozos producen gas, cuantos petróleo, cuantos hay secos, y cuantas posibles reservas hay aquí almacenadas.

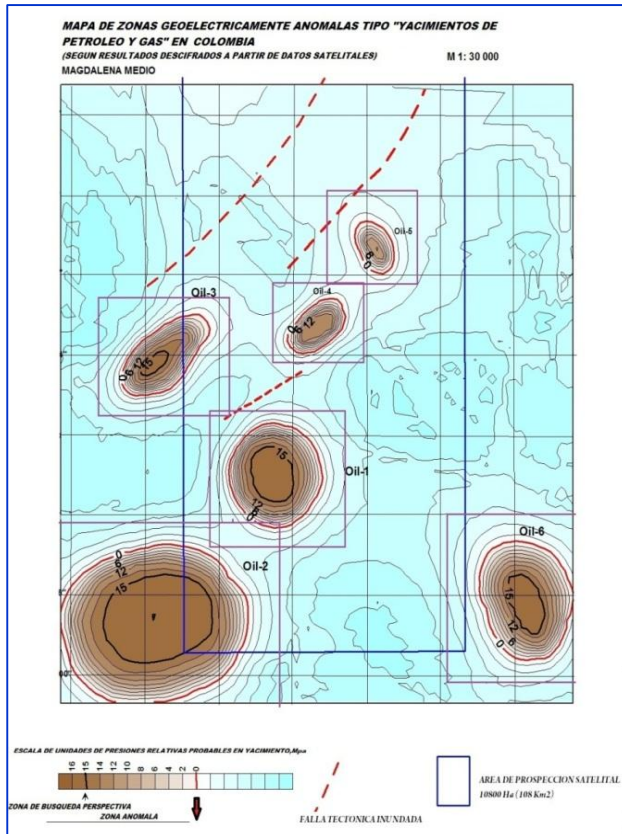
En Colombia también se hizo esta tecnología en la cuenca de los Llanos Orientales y en el Magdalena Medio véase figura 42.

Figura 42. Mapa de las zonas geo eléctricamente anómalas tipo “depósitos de hidrocarburos” en el área de interés Llanos Orientales Colombia.



Fuente. Estudio sísmico, Llanos Orientales, Energy Group. 2010

Figura 43. Mapa de las zonas geo eléctricamente anómalas tipo “depósitos de hidrocarburos” en el área de interés Magdalena Medio.

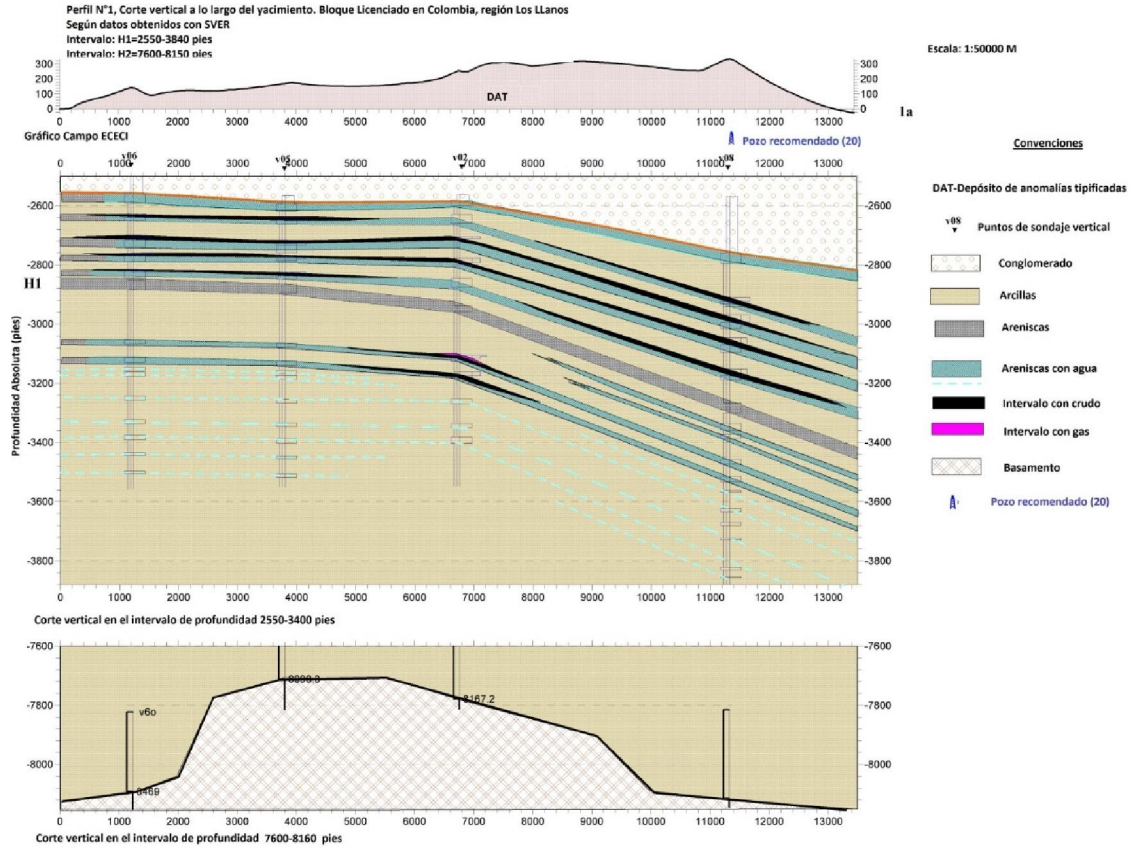


Fuente. Estudio sísmico, Magdalena Medio, Energy Group. 2009

En Colombia la han utilizado empresas como Hocol, Ecopetrol y Omega Energy Colombia.

Al final dichos informes dan una imagen satelital de todo lo que se tiene en el subsuelo y quedará como se aprecia en la figura 44.

Figura 44. Corte transversal a lo largo del yacimiento. Bloque licenciado en Colombia, región los Llanos Orientales, según datos obtenidos con SVER.



Fuente. Estudio sísmico, Llanos Orientales, Energy Group. 2010

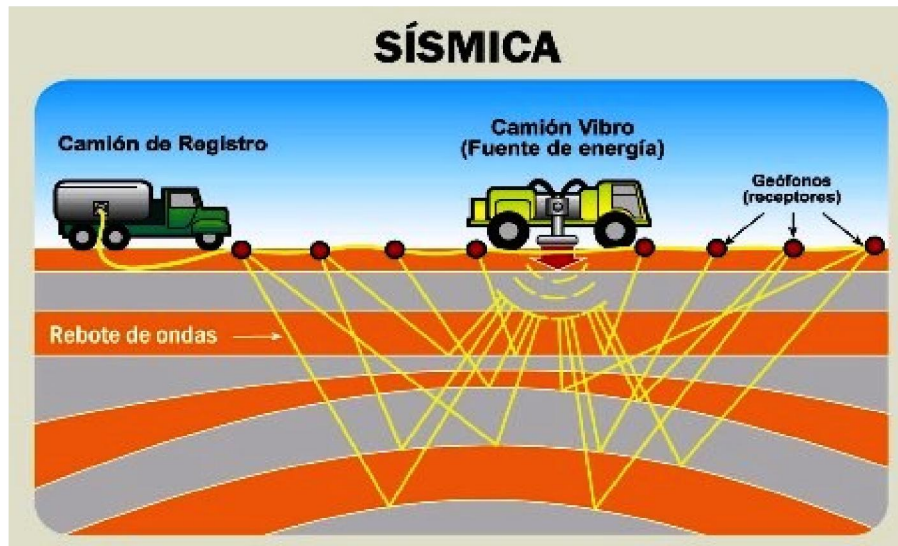
Otra tecnología utilizada implementada es la Vibroseis la cual es llevar los geófonos en un camión sin necesidad de explosivos, solo el camión descarga una plancha sobre la carretera y un camión detrás de éste hace la lectura registrándola en un computador y así se evita la implementación de cargas explosivas, cuando la zona a analizar es una zona de ladera o una zona no accesible a los camiones convencionales, estos utilizan tractores y así penetrar zonas sin dañar los ecosistemas. A continuación se observa las figuras 45 y 46 donde se aprecia mejor dicha tecnología.

Figura 45. Camión Vibroseis.



Fuente: Vibroseis Operaciones en un ambiente urbano, Oriard Lewis, consulting geophysicist 3502 Sagamore Drive. Vol. 3. 1994

Figura 46. Manejo de tecnología de Vibroseis.



Fuente: Fuente: Vibroseis Operaciones en un ambiente urbano, Oriard Lewis, consulting geophysicist 3502 Sagamore Drive, Vol. 3 1994.

3.2. Perforación

La perforación de pozos se podría catalogar como una de las actividades más contaminantes; la cual trae consecuencias más severas al medio ambiente, como se evidenció anteriormente los cortes de perforación, el mal manejo de los residuos de perforación, la contaminación a los cuerpos de aguas tanto superficiales como subterráneas, entre otros, por eso se hace necesario dar alternativas a esta etapa del desarrollo de un campo petrolero para evitar al máximo contaminaciones y poner en práctica y en normatividad algunas soluciones ya existentes en el mercado.

Uno de las innovaciones para esta etapa está en la aplicación del conocimiento de algunos ingenieros en reutilizar las viejas tecnologías y darles nuevos usos aprovechando así replantear estrategias tradicionales y reduciendo los costos al mínimo y mejor aun preservando el ecosistema sin tener que contaminarlo.

En primer lugar se tiene la tecnología La perforación Under Balance no es una metodología reciente, esta ha sido utilizada desde antes de los años 50's, en países como Estados Unidos, Canadá, Turquía, Israel, Holanda, España, Grecia, Arabia Saudita, Italia, Libia⁴⁶.

En los últimos años se ha incrementado su implementación en los países antes mencionados ya que esta técnica es muy útil y representativa para perforar pozos de desarrollo a campos maduros, es más económica y rápida que la convencional.

⁴⁶ Viabilidad técnica y económica de la perforación Under balance aplicada al campo escuela colorado, Carlos Augusto Afanador; Luis Eduardo Delgado, UIS; 2008.

A partir de estas condiciones económicas se ha llegado a un gran desarrollo tecnológico para esta técnica y gracias a esto se ha dado un auge de la perforación Under Balance permitiendo desarrollar yacimientos depletados sin los altos daños en las formaciones, navegar a través de las zonas de interés en pozos laterales, reduciendo el costo de la perforación y presentando un aumento en la vida útil de las brocas y aumentando la velocidad de penetración.

Convencionalmente, los pozos son perforados overbalanced, esto significa que el fluido de perforación genera una presión hidrostática mayor a la presión de formación, lo que proporciona la primera barrera de control para el pozo.

La perforación Under Balance (UBD) es una operación de perforación en la cual la cabeza hidrostática del fluido de perforación es intencionalmente menor que la presión de poro de la formación a la cual se está perforando. La presión hidrostática del fluido de perforación puede ser por sí sola menor que la presión de la formación, o puede ser inducida por medio de la inyección de aire, gas natural o Nitrógeno dentro de la fase líquida del fluido de perforación.

El daño a la formación causado por la perforación convencional overbalanced (OBD) puede ser reducida o eliminada por UBD, la cual puede mantener la productividad original de la formación.

Los mecanismos de daño a la formación que pueden resultar de las operaciones de perforación y que reducen la productividad de los pozos son:

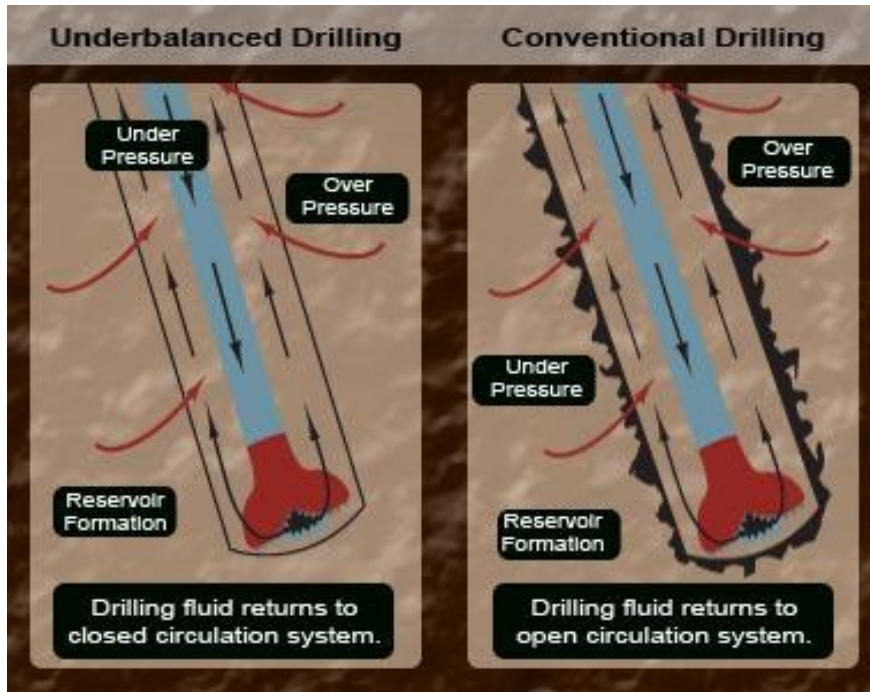
- Fluido de perforación externo / filtración de lodo invasión.
- Migración de finos.

- Fase de captura.
- Incompatibilidad química del fluido invadido con la matriz de la roca in-situ y los fluidos in-situ.
- Alteración de la humectabilidad cerca de la cara del pozo y efecto de adsorción en la superficie.

Al comparar la perforación Under Balance con la perforación convencional, se puede establecer que un influjo de fluidos de formación hacia el pozo debe ser controlado para evitar problemas de control del pozo véase figura 47.

En la perforación Under Balance, los fluidos del pozo son llevados a un sistema cerrado en superficie donde se controlan y separan, evitando descontrol en la operación. Con el pozo fluyendo, el sistema de preventoras se mantiene cerrado durante la perforación, en oposición a la perforación convencional donde los fluidos son devueltos a un sistema abierto con el pozo expuesto a la presión atmosférica.

Figura 47. Perforación Under Balance.



Fuente: Viabilidad técnica y económica de la perforación Under balance aplicada al campo escuela colorado, Carlos Augusto Afanador; Luis Eduardo Delgado, UIS; 2008. Pag. 21.

Tabla 4. Ventajas y desventajas de la perforación Under Balance.

Ventajas	Desventajas y riesgos
Reducción del daño causado a la formación	Alto costo inicial
Reduce la pérdida de la circulación	Necesidad de un equipo altamente entrenado
Se permite mayor productividad del yacimiento	Presión positiva en superficie, retornos de fluidos a alta velocidad
Reducción de costos en pruebas de productividad	Inestabilidad de las paredes del pozo

Evaluación temprana de las zonas productoras	Presencia viva de los fluidos de perforación en superficie especialmente sulfuro de hidrógeno y gases corrosivos. Erosión de las líneas de flujo
Reducción de pegas diferenciales en zonas repletadas y/o de baja presión	Riesgo de explosiones en condiciones de fondo
Aumentos en velocidad de penetración	Dificultades en la medida del rumbo del pozo
Reducción de costos en volúmenes de fluido de perforación	Se requiere de mayor potencia en las bombas debido al grado de limpieza.

Fuente: Autora.

Otra solución sería la perforación múltiple ya que permiten compartir tuberías, equipos e instalaciones en el proceso, y así disminuir la construcción de estas y evitaría daños al ecosistema; aunque tiene un valor económico más costoso que una plataforma convencional se hace más atractiva para preservar el medio ambiente, además se ha utilizado con éxito en la bahía de Prudhoe en la cuesta del norte de Alaska.

Otra innovación en perforación que ha permitido ahorrar dinero a las compañías y reducir al mínimo los impactos ambientales, sociales y culturales es la tecnología de pozos esbeltos; que consiste en que los trabajadores perforen pozos más estrechos y así utilizar menos materiales (tubería) y menos equipos. Estos han permitido a las compañías petroleras mitigar los impactos relacionados con la extensión de los actuales pozos y al

ser más estrechos entonces sus residuos van a ser menos, requieren pocos miembros en el equipo y al dejar el pozo produciendo va a dejar una huella más pequeña en el ambiente ver figura 48.

Figura 48. Plataforma de perforación de tubería en espiral híbrida colled tubing.



Fuente: Low impact Natural Gas and Oil (LINGO) winter 2006; Vol. 11 No. 1

3.3 Producción

Cuando se habla de una etapa de producción por lo general tiene que ver que en esta etapa se produce tres clases de desechos durante el proceso: agua de la formación, fluidos de la perforación y desechos asociados.

El agua de formación o el agua producida constituye el 98% de los desechos generados durante la perforación, el agua total de la formación producida

puede alcanzar millares por día. Como ya mencionamos anteriormente esta agua tiene materiales radioactivos, incluyendo sulfato de bario, sulfato del radio y sulfato del estroncio, además esta agua tiene sales y minerales y por lo general contiene trazas de hidrocarburos o productos químicos que se utilizaron durante la perforación⁴⁷

Los operadores de campo tienen tres opciones para disponer del agua producida después de que esta es bombeada y separada del petróleo; inyectarla nuevamente en la formación productora, inyectarla en una formación que ya no produce o descargarla sobre la superficie después de que haya sido tratada previamente. Aunque esta última alternativa es la más fácil también es la que genera más daños irreparables al medio ambiente. Ver figura 49.

Figura 49. Sistema de operación que se realiza al agua producida.

⁴⁷ Caracterización ambiental de la industria petrolera, Jorge Calao Ruiz, Universidad Nacional de Medellín, 2007.



Fuente: New gas and Oil S.A. Construcción, suministros y consultorías en agua, gas y petróleo.

Si bien es cierto que las autoridades ambientales han exigido para algunas áreas la reinyección como única vía de disposición del agua, buena parte del agua que planeamos re inyectar obedece a un tema de Responsabilidad Social Empresarial y, en algunos casos, colabora con el proceso de recuperación secundaria"⁴⁸.

⁴⁸ Héctor Castaño Vicepresidente de Producción Ecopetrol Colombia, en entrevista concedida al diario EL Espectador, Febrero 2013.

Ya existen en el país varios casos de reinyección de agua como se observa en el campo de Orito donde la capacidad de tratamiento supera los 20 mil barriles de agua al día. Y no se hacen vertimientos a la quebrada el Sábalo y el río el Caldero.⁴⁹

Otros casos lo vemos en la planta Colón, donde se tratará el agua de los campos del sur del Putumayo, con una capacidad de 30 mil barriles de agua por días, otros casos referenciados son Mansoyá, Chilili y Churuyaco los cuales podrán tratar 12 mil, 3 mil y 6 mil barriles de agua respectivamente⁵⁰.

Actualmente en el Huila no hay vertimientos y los 130 mil barriles de agua producidos se emplean así: 123 mil en recobro de hidrocarburos y los 7 mil restantes por reinyección al suelo⁵¹.

Otro de los mecanismos empleados para tratar el agua de producción no emulsionada y el agua residual de los campos sería la aplicación de la filtración mediante membranas instaladas en los sistemas. Una de éstas sería (para el caso de las aguas residuales) el filtro con cáscara de nuez la cual asegura un óptimo desempeño, su objetivo es disminuir la carga de aceites y sólidos suspendidos en dichas aguas. Utiliza un lecho filtrante, y ha dado buenos resultados en el país.

^{49,50,51} Héctor Castaño Vicepresidente de Producción Ecopetrol Colombia, en entrevista concedida al diario EL Espectador, Febrero 2013.

3.4 Transporte

Anteriormente se menciona que el problema radica en la instalación de los oleoductos pues en Colombia éstos deben hacerse excavando una zanja para posteriormente instalarlo y dejarlo enterrado para evitar que los grupos al margen de la ley atenten contra ellos, sin embargo cuando esto se realiza al abrir la zanja, se reviste con una geomembrana que hace que el agua superficial que queda ahí, circule solo por dicha zanja sin que siga su cruce normal, un ejemplo de esto se observa en los llanos orientales, donde en las mesetas presenta discontinuidad de la calidad del subsuelo, por lo que trae como consecuencia la pérdida de suelos fértiles, aptos para ganadería y agricultura en general.

Una solución sería aplicar la tecnología presente en Canadá o Estados Unidos que los oleoductos van a determinada altura del suelo aproximadamente 3 metros para evitar que cierto tipos de aves en su migración choquen con ellos, y así evitar dañar el ecosistema, los suelos, y la producción agraria. Ver figura 50.

Figura 50. Oleoductos en Estados Unidos



Fuente: <https://www.google.com.co/construcciondeoleoducto>

Sin embargo se debe aplicar a lo largo y ancho de las cordilleras pues el beneficio no se observaría en su totalidad si lo se le aplican a ciertos tramos (como actualmente sucede en Colombia). Como en la figura 51. La clave de dicha estrategia es no afectar tanto el suelo como el subsuelo, hay que dejar que las aguas superficiales hagan naturalmente su recorrido, para que la vegetación se preserve y se extienda mucho más su ciclo de vida.

Figura 51. Construcción de oleoductos en Estados Unidos y Canadá.



Fuente: <https://www.google.com.co/construcciondeoleoducto>



Fuente: <https://www.google.com.co/construcciondeoleoducto>

En el caso de los derrames de hidrocarburos se debe tener en cuenta una estrategia preventiva de almacenamiento en los campos como en los sitios de operación. El correcto almacenaje de dichos productos debe hacerse en zonas con terrenos estables, zonas donde no exista erosión o inundación, y sobre el nivel freático del área intervenida.

Las fuentes hídricas en el país están presentando últimamente un alto grado de contaminación, por lo cual las leyes existentes deben ser modificadas para exigir a la industria petrolera utilizar los mecanismos más acordes para tratarlas y así evitar tragedias como las mencionadas anteriormente. Todo debe ir en función de preservar los cuerpos de aguas, en especial las subterráneas ya que un futuro no muy lejano tendremos que recurrir a ellas como única fuente.

Si se continúa impactándola como hasta ahora y no solo con la industria petrolera sino con la minería, la agricultura, la ganadería, todos estos sectores demandan grandes cantidades de agua y actualmente la legislación no comprende todas las leyes y sanciones necesarias para evitar que acaben con los recursos hídricos no renovables. Tomar conciencia, valorar el agua, es la mejor herencia que podrán obtener futuras generaciones.

4. CONCLUSIONES

La industria petrolera es una de las más contaminantes del mundo, y las aguas subterráneas potables son una de las áreas del ecosistema más vulnerables dentro del proceso exploratorio y productivo de los hidrocarburos.

La exploración sísmica con el uso de explosivos afecta considerablemente las aguas freáticas subterráneas poco profundas, al generar diaclasas por donde fluye el agua cambiando su curso, con lo cual desaparece nacederos y se afecta la recarga de pozos artesianos y aljibes. Igualmente afecta los estantes naturales de agua superficial al romper los sellos de arcilla, provocando su disminución de nivel o desaparición total.

Durante la perforación de los pozos, las aguas subterráneas de poca profundidad sufren una contaminación de leve a moderada, dependiendo de las condiciones hidráulicas y reológicas de perforación. Es importante controlar el diferencial de presión y utilizar lodos estables que generen costra de lodo lo más rápido posible, para evitar el impacto producido por el filtrado de lodo a los acuíferos potables.

Durante la etapa de producción de hidrocarburos, se produce el impacto más severo, permanente e irreversible a los acuíferos potables de poca profundidad. Esto se debe a varias causas a saber: la deficiente cementación de los revestimientos, ya sea por malas prácticas de cementación (revestimientos descentralizados), cementos de mala calidad (mala adherencia), o fenómenos de esfuerzos tectónicos naturales presentes en la zona (fracturamiento del cemento por esfuerzos convergentes); los problemas de deterioro de las tuberías de producción y revestimientos,

provocados por la presencia de compuestos corrosivos como el H₂S, CO₂, entre otros; los completamientos deficientes en sellado, por mal sentamiento de empaque; y la interconexión de fracturas artificiales con fallas geológicas naturales que interconectan el yacimiento con los acuíferos. Estas causas provocan el impacto de los acuíferos debido a los flujos cruzados y migración de fluidos desde el yacimiento a través de las canalizaciones, anulares o fracturas.

Los yacimientos que poseen mecanismo de producción a través de acuíferos infinitos activos generan un impacto gravísimo sobre las aguas superficiales y subterráneas que se encuentran interconectadas con el mismo, debido a la recarga que se genera en el yacimiento a medida que se producen los hidrocarburos, las aguas de formación y/o las aguas intrusivas provenientes de la expansión del acuífero o del flujo artesiano. El impacto consiste en la disminución del caudal de los cuerpos de agua superficiales a raíz de la profundización de las aguas para recargar el yacimiento; o la disminución del nivel freático de las aguas subterráneas poco profundas debido al mismo fenómeno de recarga, a través de una geometría de flujo estable, con régimen lateral o de fondo, o a través de flancos que impactan el yacimiento para mantener la presión estable, producto de la recarga.

5. RECOMENDACIONES

Como lo demuestra el estudio, la industria petrolera es una de las más contaminantes del mundo, especialmente de las aguas subterráneas de baja salinidad, indispensables para el abastecimiento futuro del agua potable para el consumo humano; por lo cual es indispensable cambiar el paradigma del quehacer profesional del Ingeniero de petróleos, implementando en el plan de estudios tópicos especiales que propendan por generar en él la conciencia ambiental que lo lleve al desarrollo de buenas prácticas en la industria, donde se minimice el impacto a este recurso estratégico y vital para las futuras generaciones.

Impulsar desde la Universidad una cultura proteccionista de las reservas de agua superficial y subterránea de baja salinidad, buscando la aprobación de políticas, leyes y normas que mitiguen o eviten los impactos ambientales descritos en este estudio, tales como: cero vertimientos de aguas residuales y su reinyección al yacimiento; no a la exploración sísmica con explosivos en áreas de especial importancia ecológica por ser zonas sensibles ambientalmente por su alto nivel freático, su riqueza hídrica y/o, por ser fuente activa o potencial de este recurso natural vital.

Realizar o actualizar el inventario, por cuencas, de zonas de páramos, subpáramos, nacimientos de agua, recarga de acuíferos, niveles freáticos y corrientes de aguas subterráneas de baja salinidad, para disponer del conocimiento preliminar de las características hidrogeológicas de las cuencas sedimentarias colombianas, generando un insumo importantísimo y valioso

para la adecuada planificación de los trabajos exploratorios de la industria petrolera e investigaciones futuras a desarrollar.

Construir un laboratorio de aguas subterráneas para desarrollar estudios e investigaciones más profundas y precisas, identificando zonas de recarga de los yacimientos con acuíferos activos, corrientes activas de aguas subterráneas de baja salinidad, y los niveles freáticos de las cuencas.

Generar en la industria petrolera el hábito o la rutina de monitorear los niveles y la calidad de las aguas subterráneas de baja salinidad, dentro de la zona de influencia de los proyectos petroleros, a través de puntos ubicados estratégica y convenientemente; evaluando cualitativa y cuantitativamente los cambios que se produzcan en las aguas subterráneas y los factores que los provocan.

BIBLIOGRAFIA

1. ACCIÓN ECOLÓGICA; Manuales De Monitoreo Ambiental Comunitario. Quito – Ecuador 2002.
2. Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA).
3. Avellaneda, Alfonso. 1998. Petróleo, colonización y medio ambiente en Colombia, Ecoediciones. Bogotá. Colombia
4. BERTONI, C., *et al.* “Hidrología Y Procesos Hidráulicos”. Facultad de ciencias exactas, físicas y naturales, Universidad nacional de Córdoba 2011.
5. CAMPETROL Y FEDESARROLLO; Dinámica regional del sector de bienes y servicios petroleros en Colombia. Bogotá 2012.
6. CENSAT AGUA VIVA; “Impacto ambiental de la industria petrolera: Las aguas de producción”.2001.
7. CENSAT AGUA VIVA, Impacto Ambiental de la Industria Petrolera: La Perforación. 2002.
8. CENSAT AGUA VIVA, Impacto Ambiental de la Industria Petrolera: La Sísmica. 2001.
9. CORDERO CASTELLANOS Jenny Carolina y MONCADA DIAZ Álvaro Andrés; Evaluación e identificación de los factores geológicos que

controlan el Hidrodinamismo en un campo, en la cuenca de los en Colombia, Bucaramanga Universidad Industrial de Santander; Facultad de Ingeniería Físicoquímicas, 2011.

10. DECARLI R. Fernando; Taller de fortalecimiento de capacidades de investigación y desarrollo para la gestión integral de aguas subterráneas, Venezuela 2008.
11. EPA; Environmental Protection Agency, Guía para la Protección de las Aguas Subterráneas, EUA 2011.
12. EYE ENVIRONMENT, Low Impact Natural Gas and Oil (LINGO), 2006.
13. GREEN, J. y TRETT., M.W, the Fate and Effects Of Oil In Freshwater. Elsevier Applied Sc.338.1989.
14. HINOSTROZA, Jorge. 2005. Indígenas se movilizan contra el carbón. Frente de Defensa del Agua y la Vida. – La Jornada. 2005. <http://www.jornada.unam.mx/2005/mar05/050321/024n1eco.php>
15. INSTITUTO COLOMBIANO DE GEOLOGIA Y MINERIA, INGEOMINAS; Programa de Exploración de Aguas Subterráneas, Bogotá 2004.
16. MARTINEZ BONILLA Carlos Andrés; Evaluación del impacto producido en medios porosos por efecto de los métodos de exploración sísmica. 2002

17. MOLANO C. Carlos E; Exploración Sísmica y Aspectos Geológicos, Universidad de los Andes, Bogotá 2011.
18. NATIONAL ENVIRONMENTAL RESEARCH INSTITUTE; Guidelines to Environmental impact Assessment of Seismic Activities in Greenland Waters 2nd edition, New York USA 2010.
19. OILWATCH; Mano derecha del imperio, Informe de Texaco, Chevron, Caltex y Unocal, 2005.
20. OILWATCH; Manual de Monitoreo Ambiental para la Industria Petrolera.
21. OILWATCH. 2002. La Posición de Oilwatch frente a las Iniciativas de Asociación en la Cumbre de Johannesburgo (WSSD).
22. OILWATCH. 2001. "La manera Occidental de extraer petróleo". Quito. Ecuador.
23. OILWATCH. 2003. Carta abierta, www.oilwatch.org
24. QUINO, I., et al. "Determinación de la calidad fisicoquímica de las aguas subterráneas en la región norte y este del lago Poopo". Revista Boliviana de Química. Volumen 23, No 1. 2006.
25. Roa, Tatiana. 2004. El lamento de las gaitas. Revista Ruiría.
26. SARRIA, A. Estudio de posibles efectos de cargas de dinamita para exploración geofísica, sobre nacederos de agua cercanos a las explosiones en la región de Palermo, departamento del Huila". Centro

de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, 2001.

27. SHIFT Putting Principles into Practice; Stakeholder Engagement and the Extractive Industry Under the OECD Guidelines for Multinational Enterprises, USA 2013.

28. VICEMINISTERIO DE AMBIENTE; Dirección de Ecosistemas, Grupo de Recurso Hídrico; Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico, Bogotá 2010.

29. VESGA DUARTE, Jeniffer Sofía: Efectos ambientales del Shale gas, Bucaramanga Universidad Industrial de Santander; Facultad de Ingeniería Físicoquímicas, 2013.

30. Viabilidad Técnica Y Económica De La Perforación Under Balance Aplicada Al Campo Escuela Colorado; Carlos Augusto Afanador Pinzón; Luis Eduardo Delgado González; Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingeniería Físicoquímicas, 2008.

31. WALSH PERÚ; Estudio del impacto ambiental y social de la prospección sísmica 3D, perforación exploratoria del lote 101; Perú 2006.