“ESTADO DEL ARTE DE LA REINYECCIÓN Y ALMACENAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL PETRÓLEO, DE BAJA SALINIDAD, PREVIAMENTE TRATADAS, PARA SER UTILIZADAS EN FUTUROS USOS POTABLES.”

FABIÁN CAMILO TORRES GARCÍA
YEISON DUWAN MARTÍNEZ PÉREZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENÍERIA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA
2017

“ESTADO DEL ARTE DE LA REINYECCIÓN Y ALMACENAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL PETRÓLEO, DE BAJA SALINIDAD, PREVIAMENTE TRATADAS, PARA SER UTILIZADAS EN FUTUROS USOS POTABLES.”

FABIÁN CAMILO TORRES GARCÍA
YEISON DUWAN MARTÍNEZ PÉREZ

Trabajo de grado presentado para optar al título de
INGENIERO DE PETRÓLEOS

Director
OSCAR VANEGAS ANGARITA
Especialista en Gerencia de Hidrocarburos

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENÍERIA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA
2017

DEDICATORIA

A Dios, por darme la fuerza y sabiduría para alcanzar esta meta.

A mis padres, Aureliano Torres Ramírez y Enit García Aristizabal por brindarme su apoyo, una buena educación y consejos los cuales sirvieron para formaron una buena persona.

A mis hermanos Bruno Torres García y Esteban Torres García por estar conmigo, darme sus consejos y apoyarme desde la distancia.

A mi novia, Andrea Marcela López Olarte por estar conmigo, ser mi apoyo, darme su amor y sus consejos en momentos difíciles y definitivos de mi carrera.

A mis primas, primos y tías que me abrieron su corazón, las puertas de su casa y sus consejos en el transcurso de mi carrera.

A todos mis amigos y compañeros que recorrieron conmigo este camino y dieron la buena batalla para ayudarme a alcanzar este logro.

Y a todas las personas que, por una u otra razón, me ayudaron y guiaron en este proceso tan importante en mi vida.

Fabián Camilo Torres García.

TABLA DE CONTENIDO

Pág.

INTRODUCCIÓN **19**

1. ACTUALIDAD EN RECUPERACIÓN DE ACUÍFEROS Y DESTINACIÓN DE AGUAS RESIDUALES **21**

1.1 ESTRATEGIAS PARA LA GESTIÓN DE RECARGA DE ACUÍFEROS EN ZONAS SEMIÁRIDAS 30

1.1.1 Objetivos de la recarga de acuíferos (GRA). 30

1.2 TEMAS SOBRE CALIDAD DEL AGUA Y FUENTES DE AGUA DE RECARGA. 31

1.2.1 Aguas superficiales. 32

1.2.2 Escorrentía de tormenta 32

1.2.3 Agua reciclada. 32

1.3 METODOLOGIAS PARA LA GRA 33

1.3.1 Métodos de distribución. 35

1.3.2 Modificación en el interior de canal. 36

1.3.3 Pozos túneles y perforaciones. 37

1.4 ASPECTOS INSTITUCIONALES EN PROYECTOS DE GRA 38

1.5 AGUAS RESIDUALES 41

1.5.1 Concepto. 42

1.5.2 Objetivo del tratamiento de las aguas residuales. 45

1.5.3 Disposición de las aguas residuales. 47

1.6 MÉTODOS DE DISPOSICIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES DEL PETRÓLEO 50

1.6.1 Descarga sin Control a la Superficie. 51

1.6.2 Descarga sin Control en Agua Dulce. 51

1.6.3 Descarga Controlada en la Superficie. 51

1.6.4 Descarga Controlada en Aguas Superficiales. 51

1.6.5 Evaporación. 51

1.6.6 Descarga sin Control en Ambientes Marinos Costeros. 52

1.6.7 Descarga Controlada en Ambientes Marinos Costeros. 52

1.6.8 Descarga en Aguas Profundas (Sin Mareas). 52

1.6.9 Inyección en Pozo Poco Profundo. 52

1.6.10 Inyección en Pozo Profundo. 52

1.6.11 Inyección para Mantenimiento de Presión, Recuperación Secundaria. 52

2. GENERALIDADES DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS 54

2.1 CICLO HIDROLÓGICO 54

2.1.1 Sistema hidrológico. 55

2.1.2 Almacenes en el ciclo hidrológico. 56

2.1.3 Relación entre el agua superficial y subterránea 57

2.2 SISTEMAS HIDROGEOLOGICOS 58

2.2.1 Recarga del agua subterránea. 59

2.2.2 Nivel piezométrico. 60

2.3 HIDRÁULICA SUBTERRÁNEA: SISTEMA DE FLUJO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS 60

2.3.1 Potencial Hidráulico. 61
2.3.2 Régimen Permanente y Régimen Variable. 63
2.3.2 Líneas de flujo y superficies equipotenciales. 63
2.3.3 Flujo regional. 64
2.3.4 Flujo descendente y ascendente: áreas de recarga y descarga. 66
2.3.5 Medios heterogéneos. 67
2.4 ACUÍFEROS 70
2.4.1 Según las características litológicas. 71
2.4.2 Según la movilidad del agua. 73
2.4.3 Hidrogeología. 74
2.4.4 Porosidad (n). 74
2.4.5 Permeabilidad (k). 75
2.4.6 Transmisibilidad o transmisividad. 75
2.4.7 Coeficiente de almacenamiento y rendimiento específico. 76
3. GENERALIDADES Y TRATAMIENTO DEL AGUA DE PRODUCCIÓN..... 77
3.1 GENERALIDADES DEL AGUA DE PRODUCCIÓN 77
3.1.1 ¿Qué es el agua de producción? 77
3.1.2 Características de aguas de formación. 78
3.1.3 Operaciones de producción. 79
3.1.4. Componentes primarios del agua de producción. 79
3.2 PROBLEMAS AMBIENTALES ASOCIADOS AL AGUA DE PRODUCCIÓN. 80
3.2.1 Fuentes de agua potable. 81

3.2.2 Volúmenes de agua de producción. 81

3.2.3 Sales y sólidos en suspensión. 82

3.3 TRATAMIENTO Y ACONDICIONAMIENTO DEL AGUA DE PRODUCCIÓN PARA LA INYECCIÓN 84

3.3.1 Deshidratación de crudos. 84

3.3.2 Tratamiento de emulsiones. 85

3.3.3 Remoción del petróleo disperso. 90

3.3.4 Remoción de gas disuelto. 95

3.3.5 Remoción de sólidos en suspensión. 98

3.3.6 Biocidas 101

4. CONSIDERACIONES TÉCNICAS PARA EL ALMACENAMIENTO DE AGUA 106

4.1 GEOLOGÍA, ESTRATIGRAFÍA Y ANÁLISIS ESTRUCTURAL 106

4.2 HIDROGEOLOGÍA 107

4.3 HIDROQUIMICA 108

4.4 GEOFÍSICA 110

4.4.1 Geofísica de superficie. 111

4.4.2 Registro de pozos. 116

4.5 MINERALOGÍA 127

4.5.1 Métodos Macroscópicos. 128

4.5.2 Análisis Geoquímicos. 129

5. INYECCIÓN Y MONITOREO DE LAS AGUAS RESIDUALES DEL PETRÓLEO 135

5.1 COMPACTIBILIDAD DEL AGUA CON LA FORMACIÓN 135

5.1.1 Análisis iónico y mineral. 135

5.1.2 Pruebas de compatibilidad. 135

5.1.3 Pruebas de sensibilidad de la formación. 136

5.2 PARÁMETROS OPERACIONALES 136

5.2.1 Tasa de inyección. 136

5.2.2 Presión de inyección. 136

5.3 FACILIDADES DE SUPERFICIE. 137

5.3.1 Motores. 138

5.3.2 Bombas de Inyección. 139

5.3.3 Filtros 143

5.3.4 Torre Desaireadora. 144

5.4 ¿QUE ES EL MONITOREO EN LA INYECCIÓN DE AGUA? 144

5.5 MONITOREO EN SUPERFICIE 146

5.5.1 Calidad del agua 146

5.5.2 Corrosión 153

5.6 MONITOREO EN SUBSUELO 156

5.6.1 Pruebas de presión. 157

6. ESTRATEGIAS PARA LA REUTILIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES PREVIAMENTE TRATADAS, ALMACENADAS Y SU POSIBLE IMPLEMENTACIÓN EN ALGUNOS CAMPOS COLOMBIANOS. 163

6.1 USO INDUSTRIAL 163

6.1.1 Uso en Campo. 164

6.1.2 Refrigeración y Electricidad. 164

6.1.3 Control de Polvo. 166
6.1.4 Control de Incendios. 168
6.1.5 Otros 168
6.2 USO AGROPECUARIO 168
6.2.1 Uso Agrícola. 168
6.2.2 Utilización del Agua Producida para Riego Subterráneo. 173
6.2.3 Utilización del Agua de Producción como Suministro para el Ganado. 174
6.2.4 Uso de Agua de Producción para Riego de Vida Silvestre y Hábitat. 180
6.2.5 Construcción de Humedales. 182
6.3 IMPLEMENTACION EN CAMPOS COLOMBIANOS 184
6.4 CAMPOS COLOMBIANOS 187
6.4.1 Campo Castilla. 187
6.4.2 Campo Chichimene 188
6.4.3 Campo Entrerrios. 189
6.4.4 Campo La Gloria Norte. 189
6.4.5 Campo Rubiales. 190
6.4.6 Campo Santiago. 191

7. CONCLUSIONES 192
8. RECOMENDACIONES 194
BIBLIOGRAFÍA 195

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1. Sistema hidrogeológico 56

Figura 2. Sistema de flujo de aguas subterráneas. 61

Figura 3. Energía potencial y la energía de la presión. 62

Figura 4. Superficies equipotenciales 64

Figura 5. Red de flujo que esquematiza el flujo subterráneo natural en una región de conductividad hidráulica homogénea. 65

Figura 6. Entorno de la red de flujo anterior 66

Figura 7. Observación de la componente vertical del flujo mediante dos sondeos próximos. 67

Figura 8. Refracción de las líneas de flujo al pasar de un medio a otro de diferente conductividad hidráulica. 67

Figura 9. Representaciones del mapa de isopiezas. 68

Figura 10. Superficies equipotenciales en un acuífero libre con componente vertical de flujo y en un acuífero confinado con flujo horizontal. 69

Figura 11. Clasificación de los acuíferos 71

Figura 12. Tipos de acuíferos 73

Figura 13. Producción global de agua (Onshore y offshore) 78

Figura 14. Microfotografía de una emulsión agua en petróleo 84

Figura 15. Diagrama de un separador electroestático 86

Figura 16. Diagrama Gun barrel 88

Figura 17. Procedimiento para la realización de la prueba de botella 90

Figura 18. Partes de un hidrociclón 94

Figura 19. Comportamiento de la curva SP frente a rocas con alta permeabilidad y no permeables. 118

Figura 20. Comportamiento de las curvas de resistividad ante un tipo de formación y la saturación de fluidos dentro de la roca. 120

Figura 21. Comportamiento de la curva neutrón frente a rocas con alta y baja porosidad. 122

Figura 22. Comportamiento de la curva Gamma Ray frente a rocas con ausencia o contenido de arcilla. 125

Figura 23. Comportamiento de la curva de densidad frente a rocas con alta-baja porosidad y contenido de fluidos. 127

Figura 24. Esquema del modelo de Bragg. 132

Figura 25. Difractogramas de cuatro direrentes fases que corresponden al SiO_2. 133

Figura 26. Difractograma de Rayos X que muestra tres fases minerales con sus respectivas cuantificaciones. 133

Figura 27. Difractograma de Rayos X que distingue una fase cristalina y otra amorfa con los respectivos cálculos de sus concentraciones. 134

Figura 28. Sistema de Inyección de Agua Generalizado. 137

Figura 29. Curva Típica de Presión vs. Tasa para una Bomba Reciprocante y una Centrífuga 141

Figura 30. Tipos de Filtros Accionados por Presión. 143

Figura 31. Puntos del sistema a monitorear. 145

Figura 32. Celda de Corrosión en una Línea de Flujo 154

Figura 33. Tasa histórica en una Prueba de Ascenso de Presión 159

Figura 34. Secuencia Típica de Tasas en una Prueba Pulso 162

Figura 35. Torres de refrigeración 165

Figura 36. Central Eléctrica Alimentada con Carbón en Nuevo México, EUA. 166

Figura 37. Camión Cisterna Utilizado para el Control de Polvo. 167

Figura 38. Óptimo Crecimiento de Cultivos Empleando Agua de Producción. 169

Figura 39. Sistema de Riego Subterráneo con Agua de Producción 174

Figura 40. Ganado bebiendo agua de Producción 175

Figura 41. Humedal.....182

Figura 42. Producción de agua en Colombia.....185

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Actualidad en proyectos de ARS y tratamientos del agua de producción. 21

Tabla 2. Distribución del agua en la tierra 57

Tabla 3. Clasificación de acuíferos en base a su comportamiento hidráulico 74

Tabla 4. Componentes primarios del agua de producción**.** 80

Tabla 5. Bacterias Reductoras De Sulfatos 103

Tabla 6. Velocidades sónicas y tiempos de tránsito para diferentes matrices usadas en la fórmula de porosidad sónica. 121

Tabla 7. Densidades de matrix de litologías comunes usadas en la fórmula densidad 126

Tabla 8. Descripción de rocas: 128

Tabla 9. Comparación de las Bombas Usadas en Procesos de Inyección de Agua 141

Tabla 10. Métodos de Análisis del Agua 148

Tabla 11. Criterios de Calidad Admisibles para Aguas de Uso Agrícola. 173

Tabla 12. Criterios de Calidad para Agua de Uso Pecuario. 176

Tabla 13. Guía de Calidad del Agua para el Ganado y Aves de Corral. 178

Tabla 14. Comportamiento de la Salinidad en los Suelos para la Construcción de Humedales. 183

RESUMEN

TITULO: "ESTADO DEL ARTE DE LA REINYECCIÓN Y ALMACENAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL PETRÓLEO, DE BAJA SALINIDAD, PREVIAMENTE TRATADAS, PARA SER UTILIZADAS EN FUTUROS USOS POTABLES."*

AUTORES: FABIÁN CAMILO TORRES GARCÍA
YEISON DUWAN MARTÍNEZ PÉREZ.**

PALABRAS CLAVE: ACONDICIONAMIENTO, ACUÍFERO, AGUA, ALMACENAMIENTO, DISPOSICIÓN, PETRÓLEO, RECARGA, REINYECCIÓN, RESIDUO, REUTILIZACIÓN, SEPARACIÓN, TRATAMIENTO.

DESCRIPCIÓN:

La reinyección y almacenamiento de aguas residuales del petróleo ha surgido como una alternativa para evitar el agotamiento del recurso hídrico, dado por el incremento en la demanda de uso del agua, por ejemplo, para consumo humano, uso industrial y agrícola, conforme al crecimiento poblacional. Otro de los factores que se quiere resolver, son las problemáticas sociales que surgen en distintas comunidades, por la contaminación y la inadecuada disposición de las aguas residuales del petróleo.

El presente proyecto cuenta con seis capítulos donde se explica el paso a paso a considerar para una adecuada implementación en campo, cada uno brinda información precisa y veras sobre la reinyección y almacenamiento de las aguas residual del petróleo; comenzando con un recorrido alrededor de las aguas subterráneas, pasando por el tratamiento de las aguas de producción y terminando con la inyección, el monitoreo y su posible aplicación en campos colombianos, se quiere instar al lector, a las empresas de hidrocarburos, a las entidades gubernamentales y demás entidades involucradas en el sector, a que implementen este tipo de proyectos en sus procesos, para poder contribuir en el cuidado del medio ambiente y en la preservación de este líquido necesario para la vida en la tierra.

---

* Trabajo de grado

** Faculta de ingeniería Físico-Química. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Oscar Vanegas Angarita, Especialista en gerencia de hidrocarburos.

ABSTRACT

TITLE: "STATE OF THE ART OF THE REINJECTION AND STORAGE OF PETROLEUM WATER RESIDUES, OF LOW SALINITY, PREVIOUSLY TREATED, TO BE USED IN FUTURE POTABLE USES."*

AUTHORS: FABIÁN CAMILO TORRES GARCÍA
YEISON DUWAN MARTÍNEZ PÉREZ.**

KEYWORDS: WATER, STORAGE, DISPOSAL, OIL, RECHARGE, REINJECTION, RESIDUE, REUSE, SEPARATION, TREATMENT.

DESCRIPTION:

The reinjection and storage of petroleum wastewater has emerged as an alternative to avoid depletion of the water resource, given the increase in the demand for water use, for example, for human intake, Industrial and agricultural use, according to population growth. Another factor to be solved, are the social problems that emerge in different communities, for the pollution and disposal of the waste water of the oil.

The present project has six chapters which explains the step by step to consider for an adequate implementation in the field, each one provides accurate and real information on the reinjection and storage of the waste water of the oil; Go through the treatment of the production waters and ending with the injection, the monitoring and its possible application in Colombian fields, we want to urge the reader, to hydrocarbons companies, to the governmental entities and other entities involved in the sector, to implement these types of projects in their processes, to contribute to the care of the environment and the preservation of this liquid necessary for life on earth.

* Bachelor Thesis

** Faculta de ingeniería Físico-Química. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Oscar Vanegas Angarita, Especialista en gerencia de hidrocarburos.

INTRODUCCIÓN

Dado el gran crecimiento poblacional y el incremento en la demanda de uso del agua asociado por ejemplo a consumo humano, a uso industrial y agrícola, entre otros; se está afectando la disponibilidad y se promueve el agotamiento de uno de los recursos no renovables: el agua.

Como alternativa para evitar el agotamiento del recurso hídrico, en la actualidad se utiliza el método de almacenamiento y recuperación en acuíferos (ARS) o recarga artificial (AR), que básicamente consisten en inyectar agua en un acuífero determinado. El agua inyectada debe provenir de algún lugar, el agua dulce natural es la mejor opción. Para el caso de zonas tropicales dado que existen períodos invernales, en los cuales se presenta sobreabundancia de precipitaciones, esta se almacena para ser utilizada en periodos de sequía. Sin embargo, en regiones áridas dadas las bajas precipitaciones en el trascurso del año, se recurre a procesos como desalinización del agua, conducción a través de tuberías de otras zonas (importación del agua), entre otros para su inyección en acuíferos.

Durante el proceso de producción de petróleo se extraen miles de barriles de agua que son tratados para su vertimiento o inyección. Se estima que por cada barril que se produce de crudo se extraen entre cinco a diez barriles de agua en yacimientos volumétricos y esta cifra aumenta considerablemente en yacimientos no volumétricos.

Actualmente, dentro de los usos que se le dan al agua coproducida están la inyección al mismo yacimiento, vertimiento a fuentes hídricas superficiales y dispersión sobre terrenos, entre otros; sin embargo, la producción de este volumen de aguas junto con petróleo es causante en muchas ocasiones de problemáticas para su disposición.

Consecuentemente con lo anterior, el presente trabajo pretende establecer el estado del arte de los procesos de reinyección y almacenamiento de las aguas residuales del petróleo, de baja salinidad, para ser empleadas en uso potable.

Para ello, se ha organizado el documento partiendo de conocimientos básicos acerca de los acuíferos y el sistema hídrico, pasando a documentar las características de las aguas de producción, posteriormente establecer las consideraciones técnicas para el almacenamiento del agua y finalizando se establece los métodos de tratamiento e inyección del agua a almacenar.

1. ACTUALIDAD EN RECUPERACIÓN DE ACUÍFEROS Y DESTINACIÓN DE AGUAS RESIDUALES

El inicio de este proyecto se genera a partir de dos ideas. La primera es una técnica actual que se realiza en diversas partes del mundo, como una solución a la escases de agua que se presenta en ciertos lugares, cuyo nombre es ARS y/o AR (Almacenamiento y recuperación de acuíferos o recarga artificial), se basa en almacenar agua en acuíferos proveniente de diferentes fuentes, para luego poder suplir la escases de agua, la otra es una idea innovadora, la cual está asociada a la producción excesiva de agua en algunos campos de producción petrolera, consiste en tratar esta agua y luego sirva como fuente para proyectos (ARS y/o AR); de esta manera, este primer capítulo busca poner en contexto en cuanto a proyectos similares realizados recientemente y luego introducirse en el enfoque que se busca para este proyecto.

A continuación, se describen algunos artículos y proyectos realizados desde el año 2001, los cuales muestran información actual y relevante a los temas anteriormente mencionadas. Ver ***Tabla 1***.

Tabla 1. Actualidad en proyectos de ARS y tratamientos del agua de producción.

RECUPERACIÓN DE ACUÍFEROS Y ALMACENAMIENTO ARTIFICIAL		
Autor y Titulo	**Resumen**	**Conclusiones**
J. Quintana y J. Tovar, Evaluación del acuífero de Lima (Perú) y medidas correctoras para contrarrestar la sobreexplotación. Lima, Perú. 2002	Debido a la creciente demanda de agua para el abastecimiento de la ciudad de Lima y a la escasa disponibilidad de agua superficial la extracción acuífera de Lima se ha incrementado progresivamente. Las acciones que se han emprendido para	Las implementaciones del sistema de recarga artificial en el Valle del Rímac han permitido disminuir la explotación de las aguas subterráneas en 3 m3 /s. En consecuencia se ha logrado una importante recuperación del nivel freático en la mayor parte de los acuíferos Rímac y

	contrarrestar la sobreexplotación del acuífero fueron: uso racional de las aguas, a través de la micro medición, uso conjuntivo de aguas superficiales y aguas subterráneas, recarga artificial inducida e incorporación de nuevas fuentes de agua superficial.	Chillón, lográndose contrarrestar de esta manera los riesgos de sobreexplotación cuyo nivel más crítico se registró en 1997.
J.A. de la Orden, J.A. López-Geta y J.M. Murillo, Experiencias de recarga artificial de acuíferos realizadas por el IGME en acuíferos detríticos, (Madrid) España. 2003	Este trabajo describe las principales experiencias de recarga artificial realizadas hasta la fecha por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) en acuíferos detríticos. En algunas de estas experiencias los dispositivos de infiltración tan solo han funcionado a lo largo de uno o varios años con diferente duración del período de recarga. Los condicionantes técnicos, por su parte, se refieren el hecho de la necesidad de disponer de estudios previos sobre la disponibilidad de excedentes hídricos para la recarga, tanto en cantidad como en calidad, así como sobre la aptitud del acuífero para ser receptor de agua procedente de fuentes externas. Los resultados más satisfactorios se han obtenido en las experiencias realizadas con agua residual bruta, ya que en ellas, no se ha detectado contaminación en el agua subterránea procedente del agua de recarga.	En relación a aspectos técnicos cabe indicar que factores tales como disponibilidad de terrenos, usos del suelo, aptitud favorable de las autoridades públicas y gestoras del agua, consideraciones de tipo cultural, condicionantes socioeconómicos o aspectos legales, han determinado en ocasiones el éxito o el fracaso de una determinada experiencia. Con respecto a los condicionantes técnicos es preciso indicar la necesidad de realizar previamente a la construcción de la instalación de recarga artificial, un estudio detallado de disponibilidad de agua tanto en cantidad como en calidad, así como evaluar la aptitud que presenta el acuífero frente a la operación de recarga artificial, bien mediante la realización de experiencias piloto de corta duración, o bien mediante la elaboración de modelos matemáticos.

FERNÁNDEZ ESCALANTE, Enrique y SÁNCHEZ, Rosa, Exposiciones la educación ambiental aplicada a la recarga artificial de acuíferos. Copilco, México, D.F. 2006.	La divulgación y la educación ambiental, entendida como la filosofía de la divulgación, juegan un papel estratégico muy importante para acercar la técnica de la recarga artificial de acuíferos a la población. El grado de conocimiento de la técnica es bastante bajo en la actualidad, al haber adquirido mayor popularidad los trasvases, y en menor medida, la desalación y la reutilización como principales métodos de gestión hídrica. En este artículo se presenta el estado de la cuestión de la educación ambiental y se proponen unas líneas de actuación para su aplicación, basadas en propuestas de estrategias de información, formación y divulgación, dirigidas a distintos sectores de la población agrupados en grupos homogéneos.	Los estudios de AR llevados a cabo en todo el mundo están mejorando el grado de conocimiento a una velocidad vertiginosa, si bien quedan numerosos aspectos pendientes de investigación. Es la Administración la responsable de facilitar, no sólo los mecanismos de participación, sino de mejorar el nivel de información y formación de las personas implicadas y de la sociedad en general.
BILL BLACK, et al. El manejo de un recurso precioso. Vancouver, Columbia Británica, Canadá. 2008	Muchos lugares del mundo experimentan desequilibrios estacionales o a largo plazo entre la oferta y la demanda de agua dulce. Los recursos de agua subterránea son cada vez más requeridos para compensar una proporción mayor de estas insuficiencias. Con el fin de ayudar a administrar y sustentar el aprovisionamiento seguro de agua subterránea, los responsables de manejar los recursos hídricos están recurriendo a la tecnología	Como conclusión se ve la necesidad de aplicar nuevas técnicas para poder llevar a cabo proyectos AR. Pero a la vez es necesario encontrar más fuentes de agua disponible para administrar acuíferos sobrexplotados.

	avanzada de adquisición de registros geofísicos en gran parte promovida en el campo petrolero en combinación con las técnicas innovadoras de monitoreo y muestreo de fondo de pozo.	
ACUÑA BARRANTES, Ana Julia, Evaluación de la calidad del agua residual regenerada para la recarga artificial de acuíferos, Barcelona, Junio 2017	El principal objetivo de este proyecto es desarrollar herramientas y técnicas innovadoras para restaurar la calidad de los recursos hídricos para la recarga de acuíferos. En primer lugar, la tesis pretende determinar la presencia de residuos químicos antropogénicos derivados del consumo de productos farmacéuticos y de cuidado personal en aguas residuales. La recarga de acuíferos puede tener varios objetivos, por una parte, el acuífero puede actuar como método adicional de tratamiento del agua residual parcialmente regenerada, por otra, puede servir como sistema de almacenaje de agua sin necesidad de infraestructuras superficiales y por último puede servir como método de transporte de agua. Es por eso que, dadas las características especiales de las aguas subterráneas, se requiere que la calidad de las aguas tratadas y usadas en recarga no comprometan la calidad del agua de los	La revisión bibliográfica llevada cabo demuestra que el aumento del consumo del agua ha provocado la reutilización de aguas residuales, principalmente para regadío y recarga de acuíferos sobreexplotados. Esto requiere de la utilización de tecnologías avanzadas capaces de eliminar los microcontaminantes emergentes no regulados, bajo un enfoque de desarrollo sostenible.

	acuíferos ni sus posibilidades de uso posterior	
TIPOS DE DISPOSICIÓN Y TRATAMIENTOS DE LAS AGUAS RESIDUALES DEL PETRÓLEO		
Autor y Titulo	**RESUMEN**	**CONCLUSIONES**
ARPEL, Guía Ambiental No. 1, Guía Para La Disposición Y El Tratamiento De Agua Producida, Javier de viana, Montevideo Uruguay, 2001.	El agua producida puede ser tratada y eliminada por varios métodos, la mayoría de los cuales ya han sido probados y muchos de ellos aún se usan en varias partes del mundo. Estas guías describen al agua, analizan sus diversos componentes, reseñan los problemas ambientales potenciales, sugieren maneras de minimizar los volúmenes, listan los métodos de eliminación que se han probado, recomiendan métodos a usar para la protección ambiental óptima mientras se continúa con un desarrollo sustentable, especifican los tratamientos requeridos previos a la eliminación y señalan los tipos de permisos y estudios que pueden ser necesarios.	Se sugiere asimismo que se integre la eliminación del agua producida con la de todos los otros desperdicios y subproductos industriales bajo un "Plan Regional de Control de Desperdicios", para evitar la duplicación de esfuerzos y permitir un enfoque unificado ante las organizaciones ambientales y otros cuerpos reguladores.
FORERO, Jorge Enrique, ORTIZ, Olga Patricia y RIOS, Fabián, Aplicación de procesos de oxidación avanzada como tratamiento de fenol en aguas	En este artículo se trabajará las aguas residuales de la industria del petróleo, la cual tiene como característica principal la presencia de un alto contenido de compuestos orgánicos de alta toxicidad. Se analizarán de manera comparativa las tecnologías existentes, tanto	La combinación del tratamiento con ozono en medio básico con el peróxido de hidrógeno es un proceso muy eficiente para degradar los compuestos orgáni-cos tóxicos de las aguas residuales de la refinación de petróleo.

residuales industriales de refinería, Ecopetrol S.A. - ICP Instituto Colombiano del Petróleo, A.A. 4185 Bucaramanga, Santander, Colombia, 2005.	convencionales como avanzadas, recomendadas para estos casos y se mostrarán los resultados de la aplicación de algunos de estos procesos en este caso.	La relación económica de gramos de oxidante a usar en las aguas tratadas es menor cuando se usa peróxido que cuando se usa solamente ozono, además que el tiempo de reacción puede llegar a ser menor al 50%
RAMÍREZ CAMPEROS, Esperanza, *et al,* Tratamiento de aguas de la desalación del petróleo para su aprovechamiento en inyección al subsuelo, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2006.	En el proceso de desalación del petróleo crudo se generan aguas residuales (aguas congénitas). Estas aguas pueden ser utilizadas en los pozos de inyección al subsuelo, sustituyendo el agua de primer uso requerida en la recuperación secundaria de los yacimientos. Para lograr esta reutilización, se necesita aplicar un tratamiento a las aguas residuales. El objetivo de este estudio fue definir y desarrollar el mejor sistema de tratamiento de las aguas congénitas que permite obtener un efluente con la calidad adecuada para su aprovechamiento en los pozos de inyección.	El estudio de la tratabilidad de las aguas congénitas, la simulación física de cuatro diferentes trenes de tratamiento en planta piloto y la simulación del proceso de infiltración del agua tratada señalaron como una alternativa de tratamiento adecuada la que incluye los siguientes procesos unitarios: ablandamiento y sedimentación, oxidación química, descarbonatación y filtración.
GOMEZ ANGELES, Rolando Lucio, Tesis: "Tratamiento y disposición final de aguas de producción en el nor-oeste Peruano", para optar el título profesional de:	Ningún país puede escapar de la contaminación. El aire, el suelo, los ríos, el mar, etc. receptores de la última instancia de los contaminantes son propiedad de toda la humanidad y no de un solo país. La actividad petrolera no escapa de esta realidad, la tendencia actual más importante, es el del cumplimiento de las normas	La primera opción, para disposición de agua producida en la explotación de petróleo, es la inyección a pozos profundos. Existe una serie de subproductos que son generados en la explotación y desalado de petróleo, estos poseen en sus composiciones

Ingeniero de Petróleo, Universidad Nacional De Ingeniería Facultad De Ingeniería De Petróleo, Gas Natural Y Petroquímica, 2011.	de vertido a fin de proteger el medio ambiente. La presente tesis enfatiza el sistema y tecnología de tratamiento y manejo del agua producida en la explotación de petróleo.	elementos capaces de deteriorar el frágil equilibrio del ecosistema, si no son adecuadamente tratadas y dispuestas. El método de disposición adecuado y económico, es la descarga en superficie, siempre y cuando se base en la premisa de remoción de petróleo en las aguas a descargar.
LAVARIEGA PULIDO, Lourdes, Trenes de Tratamiento para Agua de la Industria Petrolera, División Académica de Ciencias Biológicas, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco Villahermosa, Tabasco, México, 2011.	La mayoría de los petróleos crudos que actualmente se extraen en todo el mundo, contienen agua y sales inorgánicas en cantidades apreciables, los cuales deben ser removidos antes de su refinación. La disposición de este desecho es difícil por los peligros de salificación de los cuerpos receptores (agua o suelo) y por la presencia de compuestos tóxicos. Para prevenir impactos negativos al medio ambiente, se requiere de la implementación de sistemas de tratamiento con procesos avanzados de alto costo, tales como la desmineralización y la oxidación química.	Actualmente existen diferentes trenes de tratamientos para agua congénita, la importancia de una selección adecuada no solo radica en el cumplimiento de la normatividad oficial mexicana existente, sino que el efluente a descargar o reinyectar al subsuelo no cause un impacto ecológico negativo al medio ambiente.
MANCILLA ESTUPIÑAN, Robinson Andres y MESA NAUSA, Henry Oswaldo, Metodología para el manejo de aguas de producción en un	Este tema incluye un Proceso entero, mecanismos efectivos de producción del yacimiento, la homogeneidad y/o estratificación del yacimiento, métodos de producción, tratamientos de superficie,	De acuerdo a la información compilada en este proyecto, se encontraron diversas opciones para la gestión del agua de producción, es decir se analizaron los métodos más comunes para evitar o minimizar

campo petrolero, Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenieras Físico-Químicas, Escuela de Ingeniería de Petróleos Bucaramanga 2012.	predicciones de volúmenes y alternativas de eliminación.	su producción, también cómo disponerla de la mejor forma cumpliendo con los parámetros requeridos dentro de la norma vigente actualmente.
REPUBLICA DE COLOMBIA, Ministerio De Ambiente Y Desarrollo Sostenible, Resolución 631 de 2015.	Se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones.	En los casos en que el vertimiento puntual de aguas residuales se realice en un cuerpo de agua superficial receptor o en un tramo del mismo, que tenga como destinación el uso del agua para consumo humano y doméstico, y pecuario la concentración de Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP) en el vertimiento puntual de aguas residuales deberá ser menor o igual a 0,01 mg/L para aquellas actividades que lo tienen definido como de análisis y reporte. Para la actividad de exploración y producción de Yacimientos no Convencionales de Hidrocarburos (YNCH), no se admite el vertimiento de las aguas de producción y de los fluidos de retorno a los cuerpos de aguas superficiales y al alcantarillado público, hasta tanto este Ministerio cuente con la información técnica

		que le permita establecer los parámetros y sus valores límites máximos permisibles.
ORTIZ VALBUENA, Marcela, Tesis: Manejo ambiental de la disposición final de los fluidos base utilizados en la perforación de algunos pozos petroleros en Colombia, Fundación Universidad de América, Facultad de Educación Permanente y Avanzada, Especialización en gestión ambiental, Bogotá D.C, 2016.	Presentar el manejo ambiental adecuado del fluido base utilizado en la perforación de pozos petroleros y de las aguas de producción, a partir del análisis de algunos estudios de caso, en los que se evaluarán los parámetros fisicoquímicos, las técnicas de disposición implementadas y los planes de manejo establecidos de acuerdo con la metodología de fichas de manejo ambiental.	El agua residual de los campos petroleros es el resultado de la mezcla del agua proveniente de las actividades de producción y el agua derivada de las actividades domésticas del campo. Por lo tanto, el agua de producción es el residuo del lodo empleado en la perforación y el agua doméstica es generada en actividades cotidianas del personal que opera en el campo. El mejor tratamiento terciario para el agua residual es la ósmosis Inversa, debido a la eficiencia que presenta esta técnica en comparación con las otras dos evaluadas, la microfiltracion y ultrafiltración.

Una vez realizado la lectura y el análisis de los artículos propuestos en la ***tabla 1*** y otras fuentes bibliográficas semejantes, se decide establecer un documento con información indispensable y necesaria para plantear un proyecto en el que se utilice aguas residuales del petróleo en la gestión y recarga de un acuífero.

1.1 ESTRATEGIAS PARA LA GESTIÓN DE RECARGA DE ACUÍFEROS EN ZONAS SEMIÁRIDAS[1]

Para poder llevar acabo esta clase de proyectos los autores buscan reunir experiencias sobre la aplicación de GRA (GESTION DE RECARGA DE ACUIFEROS) con el fin de brindar una guía y algunos ejemplos de buenas prácticas alrededor del mundo. Asimismo, realiza una introspección en cuanto a la implementación y gestión de la recarga de acuíferos como parte de estrategias para tener una mejor comprensión e implementación de planes GRA sostenibles.

1.1.1 Objetivos de la recarga de acuíferos (GRA). Los beneficios de usar el agua subterránea han sido claramente demostrados. Los acuíferos proveen una reserva de agua, que si es utilizada y gestionada con eficiencia, pueden jugar un rol vital en:

- La reducción de la pobreza/ estabilidad del sustento.
- La reducción del riesgo económico y de salud.
- El aumento de las cosechas agrícolas como resultado del riego seguro.
- La equidad de la distribución del agua (mayores niveles de agua significa mayor acceso para todos).
- La reducción de la vulnerabilidad (a las sequias, a las variaciones en la precipitación).

La extracción de agua subterránea ha sido limitada por falta de comprensión de la hidrogeología y/o de conocimiento sobre la GRA.

La GRA es una de las herramientas de gestión del agua subterránea; puede ser útil para restablecer la presión en acuíferos sobre explotados, reducir la intrusión

[1] LODDE, Eric, Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), Estrategias para la Gestión de Recarga de Acuíferos (GRA) en Zonas Semiáridas, 2005.

salina o fenómenos de subsidencia en suelos. Por si sola no es la solución en situaciones de sobre explotación de acuíferos pero hace parte de una de las opciones para mitigar la misma.

Si las entidades de ordenamiento territorial están mejor informadas serán capaces en mayor medida de dar solución a problemas relacionados con los recursos hídricos. Una de las tareas de los hidrogeólogos tiene un papel central en crear conciencia del rol que la GRA puede tener dentro del escenario geológico.

Los métodos usados y la efectividad de estas intervenciones son limitados no solamente por factores físicos sino también sociales y económicos. Los conocimientos adquiridos atreves de la experiencia, incluyendo los planes que han fracasado, son frecuentemente poco divulgados y la efectividad de los planes, está en general pobremente evaluados. Este documento pretende unificar el conocimiento actual y proveer algunos ejemplos de buenas prácticas alrededor del mundo.

1.2 TEMAS SOBRE CALIDAD DEL AGUA Y FUENTES DE AGUA DE RECARGA

La calidad del agua subterránea varía de un tipo de roca a otro y también entre acuíferos, dependiendo de los recorridos subterráneos del agua. El agua subterránea, cuando no es afectada por impactos antrópicos, es usualmente considerada de excelente calidad desde la perspectiva química, física y biológica. Sin embargo, el agua subterránea puede contener concentraciones naturales de hierro, manganeso, arsénico, boro, fluoruro, sales etc. Que la hacen inaceptable para agua potable o para otros usos. La alta calidad del agua subterránea resulta del filtro natural y del tratamiento microbiológico que sufre el agua de lluvia y el agua de los ríos mientras recorre través del suelo hacia el acuífero.

Para evaluar la eficacia de la recarga de acuíferos desde el punto de vista de la calidad del agua, es importante conocer la calidad natural del agua subterránea,

los impactos de las actividades humanas y los procesos geoquímicos involucrados. A partir de un programa de muestro de calidad de agua subterránea, el conocimiento de la hidrogeología y de las actividades antrópicas en el área, puede desarrollarse un modelo conceptual adecuado. Los posibles impactos de los planes de recarga se podrían predecir y testeados mediante monitoreo.

1.2.1 Aguas superficiales. Las aguas superficiales pueden ser una fuente importante para la recarga de acuíferos o GRA y dependiendo en las condiciones en que se encuentre se le debe realizar un tratamiento adecuado para ser almacenada ya sea si la fuente es de un rio, un lago o cualquier otro lugar se debe realizar un análisis a la misma y determinar si es o no necesario realizar tratamientos

1.2.2 Escorrentía de tormenta. La escorrentía de tormentas ya sea de zonas urbanas o rurales tiene grandes variaciones en el tiempo y de igual manera tiene variación de su calidad en algunos lugares como lo es (Saurashtra, india) esta escorrentía es canalizada hacia el interior de pozos de gran diámetro cavados a mano para recargar acuíferos directamente. Pero debe tenerse en cuenta que estas aguas pueden contener gran cantidad de contaminantes y al ser canalizada directamente hacia el acuífero los efectos de infiltración pueden perderse y generar grandes daños en los mismos.

1.2.3 Agua reciclada. Utilizar agua reciclada para recargar implica tener una fuente de volumen predecible, a una tasa uniforme y de calidad constante. El agua residual requiere tratamiento antes de ser considerada de calidad aceptable para la recarga de acuíferos, de forma de minimizar el grado de degradación de la calidad del agua subterránea. Los compuestos que representan un riesgo dependen del origen del agua residual. El agua residual como fuente de agua de recarga ofrece un potencial significativo para todos los usos no potables. Asimismo, con un pre y post tratamiento apropiado o disolución con agua

subterránea nativa, su uso como agua potable también puede ser una opción viable.

Las primeras limitaciones en la utilización de agua reciclada es la aceptación pública, así como también el costo asociado a las cañerías, las estaciones de bombeo, etc. Para trasportar el agua desde la planta de tratamiento de agua residual hacia donde sea necesario. Utilizar cuencas de distribución tiene la ventaja de mejorar la calidad del agua residual mediante el tratamiento suelo acuífero y la disolución con agua subterránea originaria. La recarga y recuperación además provee un tratamiento natural, un elemento fundamental para contribuir a la aceptación de la reutilización del agua el uso de agua residual para usos forrajeros es más aceptado que el uso de cultivos de consumo humano. Cuanto más directo es el uso que se le da al agua de recarga, se requiere niveles más altos de tratamientos y de seguridad de operación.

1.3 METODOLOGIAS PARA LA GRA.

Existen numerosos proyectos para aumentar la recarga del agua subterránea. Estos proyectos son diseñados con el objetivo principal de aumentar la recarga (recarga intencional).

Métodos de distribución.

- Cuencas y estanques de infiltración
- Tratamiento Suelo-Acuífero (TSA)
- Inundación controlada
- Recarga incidental por riego

Modificaciones en el interior del canal.

- Estanques de percolación asociados a represas de control, gaviones, etc.

- Represas de arena para almacenamiento
- Represas subsuperficiales
- Represas con perdidas

Recarga con pozos, túneles y perforaciones.

- Pozos abiertos y túneles
- Almacenamiento en Acuíferos y Recuperación (AAR)
- Infiltración inducida en las márgenes de los ríos
- Filtración en las márgenes de los ríos
- Filtración inter-dunar

Captación de agua de lluvia.

- Construcción de terraplenes, etc.
- Recolección de agua de lluvia en techos

Muchos proyectos requieren bajos niveles de tecnología y pueden ser (y han sido por siglos) implementados con poco conocimiento de ingeniería. Estos incluyen técnicas de captación de agua para aumentar la recarga, la construcción de terraplenes, y pequeños diques a través de arroyos efímeros. Las técnicas de excavación de pozos han sido desarrolladas durante generaciones y la desviación del flujo superficial hacia el interior de los pozos a pesar de potenciales problemas de contaminación), posterior a la sedimentación de la mayoría de los sólidos en suspensión, se están haciendo cada vez más populares en algunas partes de India.

1.3.1 Métodos de distribución. Los métodos de distribución de agua se aplican cuando el acuífero libre o semiconfinado que ha de ser recargado se encuentra cerca de la superficie del suelo. La recarga se logra por infiltración a través del material permeable de la superficie, el cual debe ser gestionado para mantener las tasas de infiltración.

Donde la fuente de agua de recarga es esporádica y el caudal estacional contiene grandes cargas de sólidos en suspensión, la gestión de la estructura de recarga se hace cada vez más importante con el fin de minimizar los problemas de obstrucción de forma de mantener las tasas de infiltración, y disminuir al mínimo la evaporación en aguas libres

1.3.1.1 Estanques de infiltración o recarga. En este caso se excava un estanque en el suelo o comprende un área deprimida en el suelo, que retiene el agua de recarga, hasta que se haya infiltrado a través del suelo. En algunos casos se recubre el fondo del acuífero con una capa de arena de grano medio de 0.5 m de espesor, para retrasar la infiltración, esta misma técnica es aplicada en acuíferos fisurados para evitar la intrusión de material no deseado.

La depresión debe tener la profundidad adecuada para permitir la limpieza y evitar el crecimiento de vegetación o acumulación de algas.

1.3.1.2 Inundación controlada. En áreas de topografía relativamente plana el agua puede ser desviada, mediante canales, desde un río y distribuida uniformemente sobre un área superficial amplia; formándose una fina capa de agua que se mueve a una velocidad mínima, evitando así la alteración de la cobertura del suelo. Las tasas de infiltración más altas se observan en áreas con vegetación no alterada. De forma de controlar el proceso de inundación en todo momento, bancos o zanjas deberían rodear, desde el punto de vista de la relación costo-beneficio comparada con otros métodos de distribución. Sin embargo, se requieren grandes superficies de tierra disponibles para la operación de recarga. Altas cargas de

sedimentos se depositarán en la superficie reduciendo las tasas de recarga, y es probable que haya que tomar medidas de remediación para mantener las tasas deseables.

1.3.1.3 Recarga incidental por riego. Esta técnica está relacionada al agua excedente del riego de cultivos, IWMI (2002) se estima que únicamente 60% del agua aplicada en los cultivos de arroz es utilizada, y el otro 40% restante se filtra pasando a ser el recurso hídrico subterráneo.

Cuando se produce recarga incidental por riego con agua residual urbana, surgen problemas de calidad del agua. Por ejemplo, en México el uso del agua residual municipal para riego de áreas agrícolas está ampliamente establecido. Alrededor de ciudades como León y Ciudad de México, los niveles de agua subterránea están decreciendo rápidamente en lugares donde la extracción para cubrir la demanda de la población en rápida expansión excede a la recarga. Sin embargo, en los lugares en que el agua residual es utilizada para riego, el nivel freático es cercano al nivel del suelo. El agua residual contiene contaminantes industriales de varios tipos; en León los efluentes provenientes de curtiembres son un componente importante de las aguas residuales de origen urbano. El mayor impacto en la calidad del agua subterránea en el área irrigada es las concentraciones de cloruros de 800 a 1.000 mg/l en las partes superiores. Muchos de los otros contaminantes del agua residual son retenidos o atenuados por el sistema de distribución y en las capas de suelo. Esto ayuda a evitar que contaminantes como carbono orgánico, nutrientes, metales pesados y agentes patógenos alcancen el cuerpo de agua subterránea

1.3.2 Modificación en el interior de canal.

1.3.2.1 Estanques de percolación asociados a represas de control. Una manera económica de recargar agua subterránea puede ser mediante la construcción de represas de control en los cursos de agua, siendo el material de construcción es el

mismo aluvión del río. Para evitar la erosión o destrucción anual de estas estructuras, con frecuencia se construye un vertedero de concreto y, para contener y canalizar la escorrentía superficial.

Debido a que estas estructuras retienen el agua únicamente por cortos períodos de tiempo, la tierra puede ser inmediatamente cultivada, permitiendo el aprovechamiento de la humedad del suelo, lo que puede resultar en una cosecha anual adicional. Labrar la tierra también mantiene la capacidad de infiltración, dejándola lista para la próxima entrada de agua.

1.3.3 Pozos túneles y perforaciones.

1.3.3.1 Pozos y túneles. Estas estructuras son usadas para recargar acuíferos freáticos superficiales y en zonas donde las capas superficiales tienen baja permeabilidad, y por lo tanto los métodos de distribución no son efectivos. Cada vez es más frecuente para este propósito el uso de pozos que se han secado debido a que el nivel freático disminuyó debido a la sobreexplotación.

Previamente a la recarga es necesario que los sólidos en suspensión del agua de recarga sedimenten; esto disminuirá la potencial obstrucción de los poros, en particular si la fuente es agua de tormenta. La extracción posterior de agua puede remover las partículas finas que se han depositado en los poros, y de esta forma recuperar parte de la capacidad de recarga. Además, puede ser necesaria la remoción física del sedimento y la limpieza mediante inyección de agua a presión (jetting).

1.3.3.2 Pozos con perforaciones. Las perforaciones se utilizan cuando por encima de los acuíferos de destino existen estratos de gran espesor y de baja permeabilidad, con el fin de recargar agua directamente hacia el interior del acuífero. Las perforaciones también son ventajosas cuando la superficie de tierra disponible es escasa. Sin embargo, el uso de perforaciones para inyectar agua en

acuíferos requiere mayor calidad del agua, en comparación con la recarga mediante métodos de distribución. La descripción detallada de este método se encuentra fuera del alcance de este documento, pero puede ser encontrado en Pyne (1995, 2005). Cuando la perforación es utilizada para inyección y recuperación (Almacenamiento en Acuíferos y Recuperación, AAR), los costos son minimizados y la obstrucción es eliminada durante el ciclo de recuperación. El agua puede ser inyectada hacia el interior por una perforación y recuperada desde otra, algo más distante, para incrementar el tiempo de transporte y beneficiarse de la capacidad de tratamiento del agua del acuífero. Esto se define como Almacenamiento en Acuíferos, Transferencia y Recuperación (AATR).

La tecnología necesaria para construir este tipo de estructuras puede ser bastante compleja, requiriéndose conocimientos de ingeniería. El diseño de estas estructuras puede variar considerablemente e incluye la construcción de perforaciones en la base de los pozos de recarga y su relleno con material de filtro graduado para (a) restringir el ingreso de sólidos en suspensión que rápidamente obstruirían al sistema; y (b) para restringir el ingreso de contaminantes que podrían contaminar el cuerpo del agua subterráneo.

1.4 ASPECTOS INSTITUCIONALES EN PROYECTOS DE GRA

Aun cuando los parámetros hidrológicos e hidrogeológicos de un proyecto de recarga sean favorables, el éxito del proyecto no puede garantizarse a menos que sea gestionado y operado efectivamente. Los principales aspectos institucionales a considerar se encuentran relacionados con la planificación y determinación de los objetivos y la implementación y gestión de las actividades de recarga establecidas.

Diversos métodos han sido empleados para implementar actividades de gestión de los recursos naturales, por ejemplo, la GRA, recayendo la responsabilidad recae (en distintos grados) en los gobiernos estatales, locales, agencias de

desarrollo, el sector privado, ONG y población local. En esta sección, Este ha sido el caso en India, por ejemplo, en donde los programas de desarrollo de cuencas, en general con un fuerte enfoque GRA, han destacado de manera creciente la necesidad de que la toma de decisiones sea participativa y descentralizada. Considerando que los sectores de menos recursos son por lo general los más dependientes del acervo común de recursos naturales como el agua, las mejoras en la gestión descentralizada -ya sea en la igualdad de derechos y responsabilidades, en la productividad de los recursos, o en su sostenibilidad- pueden contribuir sustancialmente en su sustento. La descentralización y la gestión participativa están claramente vinculadas. La gestión participativa puede ser definida como un proceso en el que "aquellos que tienen un interés legítimo en un proyecto, influyen en las decisiones que los afectan, y además reciben una proporción de los beneficios que de él derivan".

Un tema clave de la GRA, cuando se lleva a cabo de manera aislada o como parte de un paquete más amplio de medidas de gestión del recurso, es identificar metodologías que aseguren que la interface entre la población rural, las organizaciones locales y el Estado sea manejada de manera tal de aumentar la eficiencia, la efectividad y la responsabilidad.

Un tema clave en la etapa de definición de los objetivos es la claridad de los objetivos, y cómo (y por quiénes) son definidos. Es particularmente importante considerar las visiones e intereses de diferentes grupos - incluyendo los habitantes de las zonas aguas abajo del proyecto de recarga, y aquellas personas desprovistas de tierra o recursos hídricos privados- así como el grado en que los objetivos han sido definidos y acordados localmente. La experiencia indica que los proyectos que tienen mejor desempeño involucran a la población local en la discusión sobre cuáles son sus problemas y prioridades (por ejemplo, abastecimiento de agua potable, riego suplementario, etc.), consideran las distintas valoraciones que se le da al recurso, y son aquellos que adoptan metodologías flexibles para diversos sistemas de sustento y condiciones físicas.

Otros temas de importancia se relacionan al grado en el que las decisiones son tomadas con, o a favor de, la población local sobre: Selección o elegibilidad del área/ comunidad. Responsabilidades de participación (por ejemplo, en la construcción, la repartición de costos, etc.). Opciones técnicas (por ejemplo, para el diseño y localización de las estructuras). Nuevamente, la experiencia indica que la flexibilidad y la toma de decisiones de manera conjunta son clave: proyectos que dedican tiempo y recursos a consultar y organizar a la población local, y que claramente definen las obligaciones y responsabilidades de los diferentes grupos (por ejemplo, sobre el mantenimiento de la estructura) se desempeñan En la etapa de planificación es importante considerar los temas de distribución y equidad de la GRA. Debido a que los patrones de acceso al agua y los derechos de agua son desiguales, suponer que las actividades de recarga beneficiarán a todos por igual no es correcto. Así el proyecto debe considerar cómo serán distribuidos los costos y beneficios entre:

- Grupos sociales diferentes y de distinto poder adquisitivo; por ejemplo, considerando los potenciales beneficiarios del proyecto, ¿quién debería contribuir a los costos?
- Las áreas diferentes, ¿cómo serán afectados los usuarios aguas abajo, por ejemplo, si los flujos superficiales excedentes son utilizados como agua de recarga aguas arriba?
- Los impactos de las actividades de recarga -positivos y negativos- probablemente no estén limitados dentro de las fronteras de la comunidad.
- Períodos diferentes de tiempo, ¿existen beneficiados y perjudicados a corto y largo plazo?

En conclusión, la Gestión de la Recarga de Acuíferos (GRA) está siendo utilizada cada vez en mayor medida para la gestión y almacenamiento de agua. Hay muchos métodos que han sido desarrollados a través de los siglos, según la fuente y la disponibilidad de agua, la demanda, la geología y la estructura socio-

económica. Estos métodos están siendo ampliamente replicados y desarrollados usando tecnologías actuales, sin embargo, los ejemplos de estimaciones cuantificadas de su efectividad son limitados.

Es necesario una mejor comprensión y divulgación de cómo las estructuras de recarga funcionan realmente y de los impactos que tienen sobre la disponibilidad y calidad del agua, la sostenibilidad social y económica, así como también el impacto sobre el ambiente local y aguas abajo; de manera de promover una implementación en la cual la relación costo beneficio sea positiva y de amplio alcance.

La Gestión de la Recarga de Acuíferos debe ser considerada como parte de una estrategia de gestión integrada del agua y cuencas junto con la gestión del agua superficial y manejo del suelo, el control de la erosión y la contaminación, así como también la gestión de la demanda y del ambiente, y la reutilización del agua. Su rol será cada vez más importante, ya que la demanda crece y los impactos del cambio y variabilidad climática se hacen más visibles.

La promoción de la Gestión de la Recarga de Acuíferos debería enfocarse en compartir conocimientos y experiencias a través de redes y proyectos de demostración de buenas prácticas, junto a iniciativas de capacitación incluyendo recursos en la web, cursos, seminarios y talleres.

1.5 AGUAS RESIDUALES

Desde el momento en que aparecieron las primeras poblaciones estables, la eliminación de los residuos ha constituido un problema primordial para las sociedades humanas, ya que surgió la necesidad de deshacerse tanto de los excrementos como de los restos de alimentación. Durante las últimas décadas de este siglo, el mundo ha venido observando con inquietud, analizando y tratando de resolver una serie de problemas relacionados con la disposición de los residuos líquidos procedentes del uso doméstico, agrícola e industrial.

Las masas receptoras, es decir, ríos y corrientes subterráneas, lagos, estuarios y el mar, en la mayoría de las ocasiones, especialmente en las zonas más densamente pobladas y desarrolladas, han sido incapaces, por sí mismas, para absorber y neutralizar la carga polucional que tales residuos imponen. De esta forma, han venido perdiendo sus condiciones naturales de apariencia física y su capacidad para sustentar una vida acuática adecuada, que responde al equilibrio ecológico que de ellas se espera para preservar nuestras masas hídricas. Como consecuencia de esto, en numerosas ocasiones pierden aquellas condiciones mínimas que les son exigidas para su racional y adecuado aprovechamiento como fuentes de abastecimiento de agua, como vías de transporte o aún como fuentes de energía.

1.5.1 Concepto. Las aguas residuales se pueden definir como aquellas que por uso del hombre, representan un peligro y deben ser desechadas, porque contienen gran cantidad de sustancias y/o microorganismos.[2]

Dentro de las distintas clasificaciones que pueden establecerse de las aguas residuales, uno de los esquemas, más generalmente usado por su simplicidad, es el que las identifica por su procedencia:

- Drenaje.
- Escorrentía.
- Domésticas.
    - ✓ Fecales.
    - ✓ Limpieza.
- Industriales.

[2] ESPIGARES GARCÍA, M. y PÉREZ LÓPEZ J. A, Aguas residuales, Composición, Septiembre de 2003.

- ✓ Comerciales.
- ✓ Industriales.

- Agropecuarias.

  - ✓ Agrícolas.
  - ✓ Ganaderas.

1.5.1.1 Aguas residuales domésticas o aguas negras. Proceden de las heces y orina humanas, del aseo personal, de la cocina y de la limpieza de la casa en general. Suelen contener gran cantidad de materia orgánica y microorganismos, así como restos de jabones, detergentes, lejía y grasas.

1.5.1.2 Aguas blancas. Pueden ser de procedencia atmosférica (lluvia, nieve o hielo) o del riego y limpieza de calles, parques y lugares públicos. En aquellos lugares en que las precipitaciones atmosféricas son muy abundantes, éstas pueden evacuarse por separado para que no saturen los sistemas de depuración.

1.5.1.3 Aguas residuales agropecuarias. Procedentes de la escorrentía superficial de las labores agrícolas y pecuarias en las zonas rurales. Se caracterizan por la presencia de pesticidas, sales y un alto contenido de sólidos en suspensión. La descarga de esta agua es recibida directamente por los ríos o por los alcantarillados.

1.5.1.4 Aguas residuales industriales. Las aguas residuales industriales son aquellas que proceden de cualquier actividad o negocio en cuyo proceso de producción, transformación o manipulación se utilice el agua. Contienen aceites, detergentes, antibióticos, ácidos, grasas, otros productos y subproductos de origen mineral, químico, vegetal o animal. Su composición es muy variable, dependiendo de las diferentes actividades industriales.

1.5.1.4.1 Clasificación de las industrias según sus vertidos. Las industrias se pueden clasificar en cinco grupos de acuerdo con los contaminantes específicos que arrastran las aguas residuales.

Industrias con efluentes principalmente orgánicos.

- Papeleras.
- Azucareras.
- Mataderos.
- Curtidos.
- Conservas (vegetales, carnes, pescado, etcétera).
- Lecherías y subproductos (leche en polvo, mantequilla, queso, etcétera).
- Fermentación (fabricación de alcoholes, levaduras, etcétera).
- Preparación de productos alimenticios (aceites y otros).
- Bebidas.
- Lavanderías.

Industrias con efluentes orgánicos e inorgánicos.

- Refinerías y Petroquímicas.
- Coquerías.
- Textiles.
- Fabricación de productos químicos, varios.

Industrias con efluentes principalmente inorgánicos.

- Limpieza y recubrimiento de metales.

- Explotaciones mineras y salinas.
- Fabricación de productos químicos, inorgánicos.

Industrias con efluentes con materias en suspensión.

- Lavaderos de mineral y carbón.
- Corte y pulido de mármol y otros minerales.
- Laminación en caliente y colada continua.

Industrias con efluentes de refrigeración.

- Centrales térmicas
- Centrales nucleares.

1.5.2 Objetivo del tratamiento de las aguas residuales. El término tratamiento de aguas es el conjunto de operaciones unitarias de tipo físico, químico o biológico cuyo objetivo es la eliminación o reducción de la contaminación así como la eliminación de las características no deseables de las aguas anteriormente mencionadas.[3] La finalidad de estas operaciones es obtener unas aguas con las características adecuadas al uso que se les vaya a dar, por lo que la combinación y naturaleza exacta de los procesos varía en función tanto de las propiedades de las aguas de partida como de su destino final.

Dependiendo del origen del agua y del tipo de consumo al que va destinada, los tratamientos se pueden clasificar en cuatro grandes grupos:

- Sin tratamiento

[3] MUÑOZ CRUZ, Amílcar, "Caracterización y tratamiento de aguas residuales", Monografía para obtener el título de ingeniero industrial, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Instituto de ciencias básicas e ingeniería, Licenciatura en ingeniería industrial, México, junio de 2008.

- Solo desinfección
- Tratamiento estándar
- Tratamiento especial

Tanto para producir un compuesto como para aislarlo o eliminarlo, el número de procesos industriales que existen es muy elevado. Sin embargo, cada uno de ellos se puede dividir en una serie de etapas, denominadas operaciones, que se repiten a lo largo de los distintos procesos. Estas operaciones, llamadas generalmente básicas o unitarias poseen técnicas comunes y, se basan en los mismos principios científicos. Además, se aplican igualmente a procesos físicos, químicos y biológicos.

Desde el punto de vista de los rendimientos alcanzables en los procesos de depuración, los sistemas de tratamiento de agua residual se dividen frecuentemente en subsistemas que se pueden clasificar en:

- Tratamientos previos o pretratamientos.
- Tratamientos primarios o físico-químicos.
- Tratamientos secundarios o biológicos.
- Tratamientos terciarios.
- Etapa de pulimento y/o desinfección.

Algunos autores llaman a los tratamientos previos y primarios, como tratamientos primarios.

Esta clasificación, que en principio era totalmente inaceptable, en la actualidad existen numerosas operaciones y procesos que podrían incluirse en varias de las agrupaciones. Mediante los tratamientos previo y primario, se eliminan fundamentalmente los sólidos en suspensión y algo de materia orgánica por

impregnación; mediante el secundario, la materia orgánica biodegradable disuelta y restos de sólidos en suspensión que no fueron eliminados en el tratamiento primario.

Con el terciario se pretende la eliminación de contaminantes específicos y de todos aquellos contaminantes no retenidos en los tratamientos anteriores, fundamentalmente los contaminantes en forma de sólidos disueltos. Dentro de este último tratamiento se puede considerar incluida la desinfección, que elimina los gérmenes patógenos del agua (bacterias, virus, etc.), o bien, considerar una etapa posterior en la que se consideran las operaciones finales de pulido y/o desinfección.

Algunos de estos procesos se consideran en el capítulo 3 (Generalidades y tratamiento del agua de producción), donde se especifican los tratamientos a considerar para las aguas residuales del petróleo, tratamientos de interés para este proyecto.

1.5.3 Disposición de las aguas residuales. El tema de los vertimientos es un problema de ordenación de los recursos hídricos y, por lo tanto, va mucho más allá del mero control que sobre la calidad de éstos puede ejercer la autoridad ambiental.

Ordenar los recursos hídricos implica garantizar el acceso al recurso por parte de los diferentes usuarios y que el recurso esté disponible en cantidades y calidades mínimas para satisfacer su demanda. Para lograrlo, se deberían cambiar las “reglas de juego” que rigen la forma en que el ser humano usa el agua y, al usarla, la forma en que interactúan entre sí y con el medio natural.

En efecto, se debe desarrollar un plan de ordenamiento del recurso para la destinación genérica del agua, y que se debe reconocer que el problema no sólo está centrado en la calidad de los vertimientos, sino también en la conservación de

la calidad de los cuerpos de agua que cumplen una doble función: servir de sumideros de aguas residuales y de fuente de abastecimiento de agua.

La evolución normativa sobre el tema tratado se encuentra en el nivel de intervención para vertimientos puntuales a través de tasas retributivas para dos sustancias contaminantes (materia orgánica biodegradable y sólidos suspendidos), dejando de lado los vertimientos no puntuales que son tan importantes como críticos, por su alta contribución a los procesos de contaminación, no sólo de los cuerpos de agua receptores, sino también de los suelos drenados por ellos.

- Vertimientos no puntuales. Corresponden a aquellos a los cuales no se les puede precisar el punto exacto de descarga, tal como ocurre con los vertimientos que se incorporan a la escorrentía superficial, sub superficial y subterránea (originados normalmente en actividades agropecuarias y mineras).
- Vertimientos puntuales. Son aquellos que se vierten a través de un foco de fácil localización, tal como sucede con algunos vertimientos industriales, los desagües del alcantarillado municipal y las descargas de plantas de tratamiento de aguas residuales.[4]

En apariencia, es fácil establecer los vertimientos puntuales, lo cual permitiría establecer el inventario de los mismos en cuanto a fuente, composición, concentraciones y cargas contaminantes, empero, no resulta nada fácil determinar con exactitud, las mismas características de los vertimientos no puntuales, por su misma naturaleza.

[4] LONDOÑO PÉREZ, Rubén Darío y PARRA MARTÍNEZ, Yanneth, Manejo de vertimientos y desechos en Colombia, Una visión general Revista Épsilon Nº 9: 89-104 / Julio - diciembre 2007.

De acuerdo con lo anterior, ¿Será fácil determinar, la proveniencia de los vertimientos no puntuales, si se presentan a través de la escorrentía superficial y sub superficial? Si esto es así, ¿a quién se le puede señalar como responsable de dichos vertimientos?

Para vertimientos puntuales parece ser claro el asunto: se pueden individualizar los responsables de vertimientos practicados a cuerpos de agua o a sistemas de alcantarillado, en cuanto, a pesar de su complejidad, la autoridad ambiental decida acometer el inventario de tales vertimientos.

¿Y el inventario de los vertimientos no puntuales? Por voluntad propia un agricultor puede declarar el uso de un determinado caudal de agua para riego, pero ¿cuánto de éste es vertido de manera difusa a cuerpo de agua alguno? Al convertirse en escorrentía superficial o sub superficial recibirá los aportes de otros usuarios y aún de la lluvia que sobre el agua caiga, lo cual, hace difícil y, porque no imposible su cuantificación. Ésta situación no obstante parece continuar así, aún con los avances científicos y tecnológicos disponibles hoy en día.

1.5.4.1 Panorama en Colombia. La disposición de las aguas residuales en Colombia es una problemática ambiental grave, en el país sigue en mora de tratar las aguas residuales que generan cerca el 70 por ciento de los municipios, una problemática ambiental que para algunos sectores aún está lejos de superarse.

La situación del país es similar a la de la región latinoamericana que sigue sin limpiar el 80 por ciento de estas aguas usadas y que terminan contaminando los ríos y mares.

Según las últimas revisiones de la Asociación Colombiana de Ingeniería (Acodal) solo 31 por ciento de las ciudades colombianas cuenta con sistemas de tratamiento de estas corrientes.

“El 29 por ciento de los sistemas existentes es de tipo primario (remoción de sólidos gruesos, sedimentables, arenas, grasas) y no se conoce la eficiencia de los mismos”, señala Maryluz Mejía de Pumarejo, presidente ejecutiva de Acodal.

La asociación también advierte que la inversión en el país destinada al tratamiento de aguas residuales no alcanza a representar ni el 1 por ciento de la que tiene como fin proveer de agua potable.

“Claro, la primera necesidad es ofrecer agua potable y alcantarillado a los habitantes de las ciudades. Pero veamos la paradoja, si la cobertura de alcantarillado aumenta, más descargas concentradas van a parar a las fuentes hídricas que ya presentan vulnerabilidad y déficit”, subraya Mejía.

Para Gustavo Galvis Hernández, presidente de la Asociación Nacional de Empresas de Servicios Públicos y Comunicaciones (Andesco), el déficit de cobertura obedece en parte a la percepción de que este tipo de obras generan efectos negativos en los municipios, donde se ubican las plantas de tratamiento de aguas residuales.[5]

1.6 MÉTODOS DE DISPOSICIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES DEL PETRÓLEO[6]

A continuación, se enumeran muchos de los métodos de disposición empleados sin considerar su efecto sobre el medio ambiente, y no debe interpretarse como una recomendación de los mismos.

La legislación en muchas zonas ya está restringiendo severamente los métodos no aptos e inaceptables para la disposición del agua.

---

[5] EL TIEMPO, Siete de cada diez municipios no tratan sus aguas residuales, Vida – Medio ambiente, 22 de marzo de 2017.

[6] ARPEL, Guía Ambiental No. 1, Guía Para La Disposición Y El Tratamiento De Agua Producida, Javier de viana 2345 CP 11200 Montevideo Uruguay.

1.6.1 Descarga sin Control a la Superficie. En este caso, el agua producida original fue simplemente descargada de la concesión al suelo. El contenido de petróleo no fue medido o controlado y los efectos no fueron considerados. Esta costumbre llevó a la contaminación de las capas freáticas superficiales y del agua potable y a la acumulación de grandes cantidades de sal en el suelo, tornándolo inutilizable.

1.6.2 Descarga sin Control en Agua Dulce. La descarga de agua producida en arroyos, ríos y lagos ha conducido a la destrucción de estos cuerpos de agua, a la destrucción de peces y especies, a la matanza de otras especies acuáticas, y a paisajes deplorables. La contaminación de estas corrientes también ha llevado a la polución de las aguas freáticas y de otras fuentes de agua potable.

1.6.3 Descarga Controlada en la Superficie. La descarga controlada en la superficie es practicada algunas zonas, principalmente en los estados septentrionales de los Estados Unidos de Norte América. El agua producida es usada para rociar los caminos en el invierno y su contenido salino aprovechado para derretir el hielo y la nieve a temperaturas cercanas al punto de congelamiento. La descarga en la superficie también se practica en algunas zonas áridas del mundo en donde el agua es rociada sobre los caminos para controlar al polvo.

1.6.4 Descarga Controlada en Aguas Superficiales. La descarga controlada en aguas dulces superficiales se practica también en algunas zonas, por ejemplo, en Wyoming, EE.UU. Se ejerce el control sobre la cantidad de sales disueltas totales en el fluido (en Wyoming el límite es de 5000 ppm), en el uso del agua - por ejemplo, alimento para ganado - y en su concentración en las zonas de la descarga relacionándola con la población y con el uso del agua en la zona.

1.6.5 Evaporación. En las zonas áridas donde las tasas de evaporación son altas, el agua producida se coloca en fosas y se deja para que se evapore. El agua se

purifica por la evaporación, pero las sales y sólidos disueltos permanecen en la fosa de evaporación. Eventualmente, se deberá disponer de estos sólidos en forma segura.

1.6.6 Descarga sin Control en Ambientes Marinos Costeros. La descarga sin control en ambientes marinos costeros ha sido común debido a la ubicación de muchos campos (estuarinos) de petróleo. Esto ha llevado a la concentración de metales y aceites pesados en la vida marina y a la contaminación costera.

1.6.7 Descarga Controlada en Ambientes Marinos Costeros. Las descargas controladas en ambientes marinos costeros comprenden principalmente un control del contenido del petróleo y del punto de descarga. Los objetivos principales son evitar las aguas muertas o estancadas y las zonas pesqueras.

1.6.8 Descarga en Aguas Profundas (Sin Mareas). Las descargas desde plataformas han sido comunes. Los controles en donde se han aplicado, han sido dirigidos principalmente al contenido de petróleo.

1.6.9 Inyección en Pozo Poco Profundo. La inyección en pozos poco profundos es popular en algunas zonas. El riesgo de contaminación de las capas freáticas poco profundas y del agua potable subterránea aumenta obviamente a medida que disminuye la profundidad de inyección.

1.6.10 Inyección en Pozo Profundo. La inyección de agua a zonas profundas, no asociadas (a una profundidad de más de 600 pies) se ha utilizado por varios años en muchas zonas.

1.6.11 Inyección para Mantenimiento de Presión, Recuperación Secundaria. Los fluidos son reinyectados para apoyar la recuperación adicional de petróleo del campo. Cuando la disposición produce daño al medio ambiente, se exigen programas correctivos a la industria. Estos programas probablemente requerirán altos niveles de desembolso, multas y otras medidas punitivas, la demostración de

que los métodos de disposición propuestos evitarán problemas adicionales y de que las opciones de tratamiento para la corrección de los problemas causados son las más adecuadas. El Programa de Acción Correctiva de los Estados Unidos de Norte América proporciona detalles de estos programas.

En conclusión, con lo anterior, si bien se reconoce un avance importante para el manejo de los vertimientos, hay situaciones que permanecen sin solución de continuidad tales como los vertimientos no puntuales que son los de mayor aporte de contaminación orgánica y la determinación de la calidad de los cuerpos de agua en función de sus posibilidades de uso, las cuales son actividades de la competencia de las autoridades ambientales regionales.

Por esta razón, es necesario implementar estrategias que solucionen la contaminación ambiental causada por las aguas residuales, de esta manera generar alternativas, utilizando las últimas tecnologías para su tratamiento y su posterior disposición es esencial. De esta manera se reducirá el impacto ambiental y se generaran alternativas de reutilización para estas aguas.

Uno de los pilares de esta tesis, además de generar conciencia en el lector, es proponer unas alternativas novedosas en el tratamiento y disposición de las aguas residuales del petróleo. Ya que hasta el momento las técnicas utilizadas a nivel mundial no son las mejores, causando graves problemas ambientales y sociales.

2. GENERALIDADES DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS

Para realizar un proyecto de reinyección y almacenamiento de aguas residuales, en este caso del petróleo, se debe considerar y estudiar cada uno de los capítulos con detalle y profundidad, los cuales muestran teóricamente los pasos a considerar a la hora de realizar un proyecto de tal envergadura, de esta manera, este capítulo lo llevara a recorrer los conceptos fundamentales del ciclo hidrológico y de las aguas subterráneas.

2.1 CICLO HIDROLÓGICO

El ciclo hidrológico involucra un proceso de transporte re circulatorio e indefinido o permanente, que comprende la sucesión de etapas que atraviesa el agua al pasar de la tierra a la atmósfera y volver: ascendente por evaporación y descendente por las precipitaciones y después en forma de escorrentía superficial y subterránea[7]. De esta definición deben remarcarse dos aspectos importantes: *a)* la escorrentía subterránea es mucho más lenta que la superficial y esta lentitud le confiere al ciclo ciertas características fundamentales, como es que los ríos continúen con caudal mucho tiempo después de las últimas precipitaciones, y *b)* las aguas subterráneas no son más que una de las fases o etapas del ciclo del agua, y el desconocimiento de esta condición puede provocar que se exploten como si no tuvieran relación con las precipitaciones o la escorrentía superficial, con los consecuentes resultados[8].

El movimiento del agua en este ciclo es permanente por dos causas: el sol proporciona la energía para elevar el agua (evaporación) y la gravedad terrestre, hace que el agua condensada descienda (precipitación y escurrimiento).

---

[7] ORDOÑEZ, Galvez. Ciclo hidrogeológico. Lima: Sociedad Geografica de Lima, 2011. 44 p. ISBN: 978-9972-602-77-1

[8] PLADEYRA, SC; ESCOLERO Oscar; DOMINGUEZ Eloisa y MARTINEZ Sandra. Ciclo hidrogeológico. En: Atlas de la cuenca Lerma-Chapala. México. 2006.

En el ciclo hidrogeológico se ocupan varias ciencias, a saber:

- Meteorología y climatología: agua en la atmósfera.
- Hidrología: aguas superficiales.
- Hidropedalogía: agua en los suelos.
- Hidrogeología: aguas subterráneas.

2.1.1 Sistema hidrológico. Un sistema viene a ser un conjunto de partes diferenciadas que interactúan como un todo. El ciclo hidrológico es un sistema, cuyos componentes son: precipitación, evaporación, escurrimiento superficial y subterraneo[9].

El agua de precipitación (P) que alcanza la superficie terrestre, escurre parcialmente como agua superficial (R) y parcialmente se infiltra en el subsuelo y escurre como agua subterránea (G). ***(Figura 1)***.

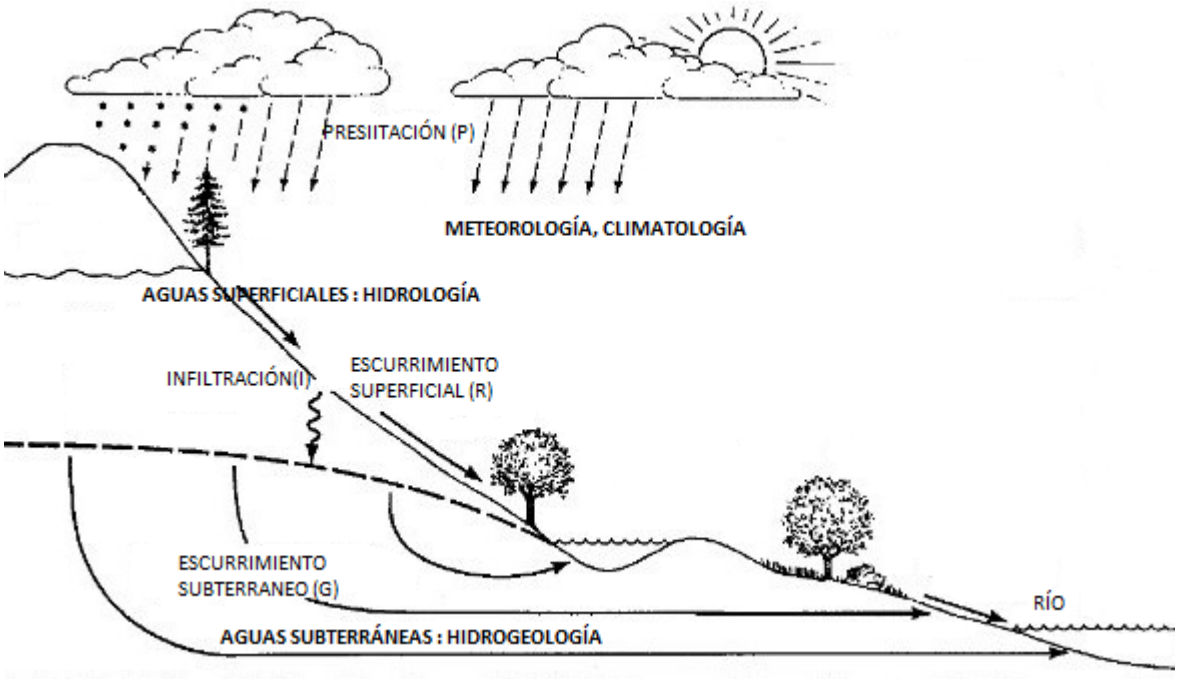
Las cantidades de escurrimiento dependen del grado de precipitación, sin embargo, gran parte de ella se pierde en la evaporación (E), y esta última depende de la temperatura.

El interflujo es la parte del escurrimiento superficial que se retarda por una vegetación densa y por su curso por los horizontes superficiales del suelo.

El agua subterránea en su mayor parte sale en manantiales y sigue escurriendo en los ríos como aguas superficiales. El escurrimiento en tiempos secos de un río se origina exclusivamente en sus manantiales.

[9] WERNER, Joerg. Introducción a la hidrogeología. México: Universidad Autónoma de Nuevo León, 101 p. 1996.

Figura 1. Sistema hidrogeológico



Fuente: WERNER, Joerg. Introducción a la hidrogeología.

2.1.2 Almacenes en el ciclo hidrológico. Los lugares donde se encuentra el agua, transcurriendo el ciclo hídrico, pueden ser considerados como almacenes, independientemente de los períodos de almacenamiento tan diferentes.

Existen almacenes de muy corto plazo como los cauces de los ríos, y de largo plazo como los glaciares; en los cuales el agua puede estar almacenada para diez mil años y más. Para el caso de las aguas subterráneas el tiempo de retención puede variar dependiendo del grado de confinamiento y las características de los acuíferos.

En la ***tabla 2***, además de mostrarse los diferentes almacenes de agua, se evidencia la distribución de la misma en la tierra; 10.530.000 km3 de agua dulce se encuentra almacenada en aguas subterráneas, considerando así un almacén de agua de suma importancia que ha de ser estudiado.

Tabla 2. Distribución del agua en la tierra

DISTRIBUCIÓN DEL AGUA EN LA TIERRA				
Situación del agua	**Volumen en km^3**			
	Agua dulce	**Agua salada**	**% agua dulce**	**% agua total**
Océanos y mares	-	1.338.000.000	-	96,5
Casquetes y glaciares polares	24.064.000	-	68,7	1,74
Agua subterránea salada	-	12.870.000	-	0,94
Agua subterránea dulce	10.530.000	-	30,1	0,76
Glaciares continentales	300	-	0,86	0,022
Lagos de agua dulce	91	-	0,26	0,007
Lagos de agua salada	-	85,4	-	0,006
Humedad del suelo	16.5	-	0,05	0,001
Atmósfera	12.9	-	0,04	0,001
Embalses	11.47	-	0,03	0,0008
Ríos	2.12	-	0,006	0,0002
Agua biológica	1.12	-	0,003	0,0001
Total agua dulce	**35.029.110**		100	-
Total agua en la tierra	**1.386.000.000**		-	100

Fuente: LICEO INDUSTRIAL BENJAMÍN DÁVILA LARRAÍN, análisis de agua.

2.1.3 Relación entre el agua superficial y subterránea[10]. Desde el punto de vista de su estudio hay que tener en cuenta una serie de características diferenciales entre las aguas superficiales y subterráneas:

[10] FUENTES, Jose Luis. Aguas Subterráneas. Madrid: Ministerio de agricultura, pesca y alimentación, 32 p. 1992.

a) La velocidad de desplazamiento de las aguas superficiales es muy superior (del orden de las 100.000 veces) a la de las aguas subterráneas.

b) EI volumen de agua subterránea almacenada es mucho mayor que el volumen del agua que discurre superficialmente en un momento dado.

c) Las aguas que discurren superficialmente se concentran en un pequeño número de ríos, mientras que las aguas subterráneas se mueven y ocupan grandes extensiones.

d) Las corrientes superficiales tienen grandes variaciones de caudal, mientras que las subterráneas experimentan unas variaciones muy pequeñas.

2.2 SISTEMAS HIDROGEOLOGICOS

Los recursos de aguas subterráneas no son yacimientos que se explotan hasta su agotamiento, como es el caso de los yacimientos de petróleo. Más bien son sistemas hidrodinámicos recuperándose permanentemente como parte del ciclo hidrológico, del cual ya se hablaba anteriormente; esto por ser recargados por agua de precipitación.

Por eso el reconocimiento de la cantidad de recarga de sistemas hidrogeológicos es una de las tareas más importantes de la hidrología.

El agua que precipita no se infiltra en su totalidad debido a que sufre pérdidas por evapotranspiración y escorrentía superficial. Solamente la parte no afectada, infiltración efectiva (IE), alcanza el agua subterránea (nivel freático) y alimenta su flujo, denominado escurrimiento subterráneo (G), que sale en la zona de descarga que pueden ser manantiales o cauces de ríos. También puede tener una descarga adicional, como son los pozos utilizado por el hombre para diferentes fines.

Para un sistema hidrogeológico cerrado, que no obtiene recarga por fuera y que se descarga totalmente, se cumple que:

$$Infiltración\ efectiva\ (IE) = Recarga = Escurrimiento\ subterráneo\ (G) = Descarga$$

Además, es válido que:

$$IE = P - ET - R$$

Dónde:

- IE= Infiltración efectiva
- P= Precipitación
- ET= Evapotranspiración
- R= Escurrimiento superficial

2.2.1 Recarga del agua subterránea. En la hidrogeología el reconocimiento de la recarga de los sistemas de flujo del agua subterránea es una de las tareas más importantes. Si se quieren evitar sobreexplotaciones de los acuíferos con sus consecuencias desfavorables, hay que conocer la recarga natural del sistema hidrogeológico.

Este es un parámetro decisivo para determinar las cantidades de agua disponibles para el uso humano. Si se trata de una recarga por pura precipitación sin influencias de cauces de ríos o de lagos, la tasa de recarga es igual a la infiltración efectiva (IE)[11].

Sin embargo, la tasa de recarga no depende solamente del clima, sino también de la velocidad de infiltración, ya que el agua de lluvia infiltrándose rápidamente está

[11] WARNER, Óp. Cit.

fuera del escurrimiento superficial, así como de la evaporación y evapotranspiración.

La velocidad de infiltración depende de

- La permeabilidad del suelo
- La capacidad de campo del suelo
- La inclinación de la superficie

La variación de estas condiciones geológicas-edafológicas causa una variación espacial grande de la tasa de recarga, dentro de un mismo sistema hidrogeológico.

2.2.2 Nivel piezométrico. El nivel freático de los acuíferos libres aflora en los pozos y norias como espejo de pozo. En los pozos de acuíferos confinados el espejo de pozo corresponde al nivel de presión del acuífero.

El flujo del agua subterránea por el medio poroso o acuífero es causado por el potencial hidráulico. El agua se mueve desde los niveles de energía potencial más altos a los niveles energéticos más bajos. Su energía entonces procede de las diferencias de nivel o de presión, y ésta se consume por la fricción con las superficies del medio rocoso a través del que circula.

El potencial hidráulico en cualquier lugar del acuífero corresponde al nivel piezométrico o a la presión del agua subterránea en ese mismo lugar. En un mismo lugar pueden existir potenciales diferentes a diversas profundidades.

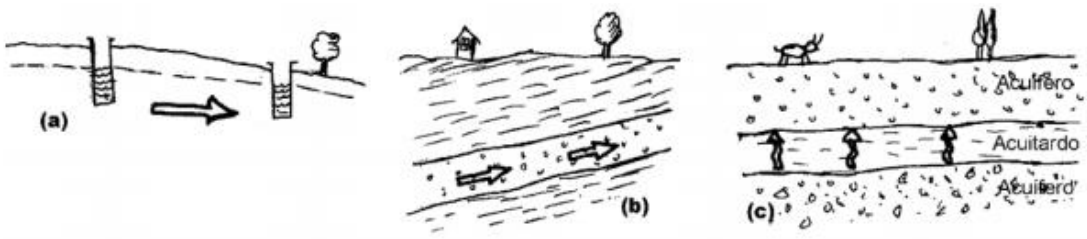
2.3 HIDRÁULICA SUBTERRÁNEA: SISTEMA DE FLUJO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

Un sistema de flujo de agua subterráneas comprende la recarga, el flujo horizontal y la descarga del agua; y esto es lo que se conoce como ciclo hidrogeológico.

El agua subterránea de un sistema puede pasar por varios acuíferos de diferente tipo, que tienen contacto entre sí.

Intuitivamente, se puede pensar que el agua circula de los puntos donde está más alta hacia los puntos en los que está más baja, como sucede en las aguas superficiales y muchas veces también se cumple para las aguas subterráneas ***(Figura 2a)***. De igual manera, es frecuente que el agua subterránea circule hacia arriba, como en la ***figura 2b***, o incluso verticalmente hacia arriba, como en la ***figura 2c***[12].

Figura 2. Sistema de flujo de aguas subterráneas.



Fuente: UNIVERSIDAD DE SALAMANCA. Hidráulica subterránea: principios básicos.Pdf

2.3.1 Potencial Hidráulico. El agua se mueve de los puntos en los que tiene más energía hacia aquellos en los que tiene menor energía. Esa energía se denomina *potencial hidráulico,* lo que queda reflejado precisamente por la altura de la columna de agua en ese punto.

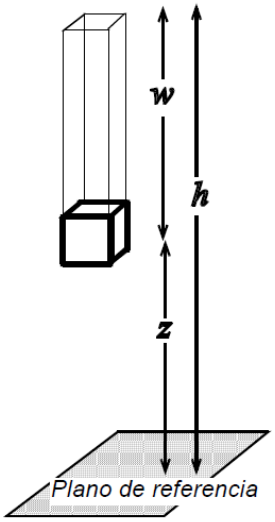
Si se considera, un volumen unidad de agua de densidad ð en un punto del espacio situado a una altura z respecto de un nivel de referencia ***(Figura 3)***. Sobre ese volumen existe una columna de agua de altura w.

La energía total por unidad de masa se denomina potencial hidráulico, y es igual a la altura de la columna de agua, respecto del nivel de referencia considerado,

[12] UNIVERSIDAD DE SALAMANCA. Hidráulica subterránea: principios básicos. 2014. Pdf

multiplicada por la aceleración de la gravedad. Como gravedad (g) es prácticamente constante, altura (h) refleja exactamente el potencial hidráulico (Φ).

Figura 3. Energía potencial y la energía de la presión.



Fuente: UNIVERSIDAD DE SALAMANCA. Hidráulica subterránea: principios básicos. Pdf

$$Energía\ potencial = masa \times gravedad \times altura = \delta \times g \times z$$

La presión que soporta ese volumen unitario sería el peso de la columna de agua dividido por la superficie.

$$Peso = masa \times g = volumen \times \delta = base \times altura \times \delta \times g = 1 \times w \times \delta \times g$$

$$Energía\ de\ presión = \frac{Peso}{Superficie} = \frac{w \times \delta \times g}{1}$$

$$Energía\ total\ por\ unidad\ de\ volumen = \delta \times g \times z + w \times \delta \times g$$

Dividiendo por la densidad (δ), quedaría la energía total por unidad de masa:

$$Energía\ total\ por\ unidad\ de\ masa = E \times potencial + E \times presión = g \times z + w \times g$$
$$= (z + w) \times g = h \times g$$

$$\emptyset = h \times g$$

2.3.2 Régimen Permanente y Régimen Variable. Cuando un sistema de flujo no varía con el tiempo se trata de un régimen permanente, estacionario o en equilibrio. Cuando el flujo varía con el tiempo, se trata de un régimen no permanente o variable.

2.3.2 Líneas de flujo y superficies equipotenciales. Una línea de flujo es la envolvente de los vectores velocidad en un instante determinado. Las trayectorias son los caminos seguidos por las partículas de agua en su recorrido. En un régimen permanente las trayectorias coinciden con las líneas de flujo, en un régimen variable pueden no coincidir.

Una superficie equipotencial es el lugar geométrico de los puntos del espacio que tienen un mismo potencial hidráulico. Por tanto, el flujo se producirá perpendicularmente a las superficies equipotenciales.

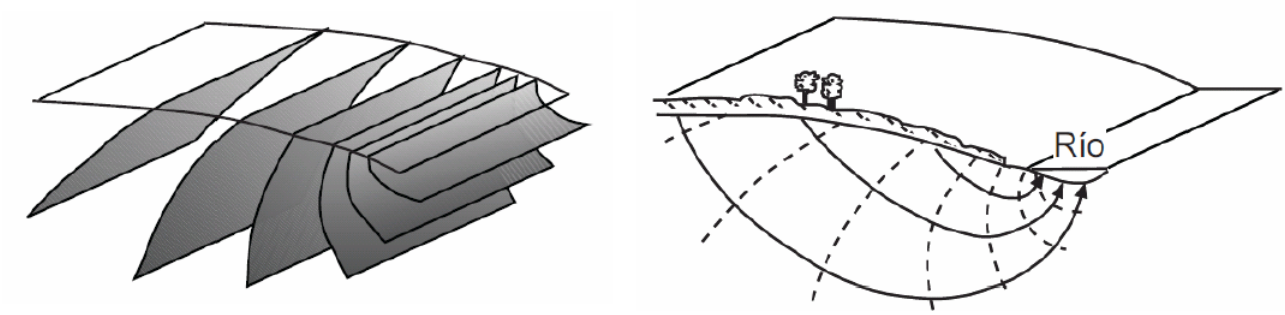
En la ***Figura 4*** se observa las superficies equipotenciales que podrían existir debajo de una ladera, suponiendo que la distribución de la permeabilidad en el subsuelo fuera isótropa y homogénea.

Una red de flujo, tal como la que se aprecia en la ***figura 4*** derecha, es una representación esquemática del flujo en un plano mediante líneas de flujo y líneas equipotenciales. Las líneas equipotenciales son la traza de las superficies equipotenciales al ser cortadas por el plano en que se dibuja la red de flujo. El flujo siempre es tridimensional, así que las redes de flujo, de dos dimensiones pueden trazarse en un plano horizontal o en un corte vertical.

El trazado de una red de flujo debe cumplir estas condiciones:

- Necesario: Ambas familias de líneas tienen que cortarse perpendicularmente.
- Conveniente: Los espacios resultantes deben ser “cuadrados”, es decir han de ser proporcionados.

Figura 4. Superficies equipotenciales



Fuente: UNIVERSIDAD DE SALAMANCA. Hidráulica subterránea: principios básicos. Pdf

2.3.3 Flujo regional. El flujo natural del agua subterránea en una región también se esquematiza mediante redes de flujo. Si el subsuelo es homogéneo e isótropo la forma de la superficie freática es la que gobierna toda la red. Si la geología es compleja, la representación es solamente una simplificación de la realidad.

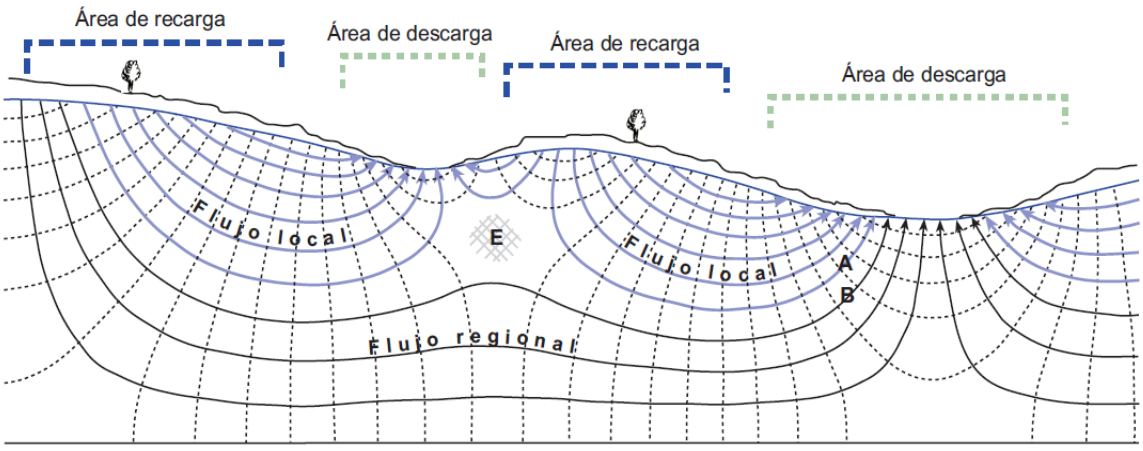
A continuación, en la ***figura 5*** se observa:

- Áreas de recarga y de descarga: Las áreas de recarga son aquellas en que el flujo subterráneo presenta un componente vertical descendente, y las áreas de descarga presenta un componente ascendente. Aunque en este esquema tienen escasa entidad, también existen áreas intermedias en las que el flujo es prácticamente horizontal.
- Flujos locales y regionales: La diferenciación es relativa, depende de la escala que se considere. Los flujos locales normalmente están asociados a valles de menor entidad y los flujos regionales a los valles principales de

una región. En la misma vertical dos sondeos pueden encontrar aguas de calidad química muy distinta, como en los puntos marcados como A y B en la ***figura 5***. El agua en B procede de un flujo regional (la cual presenta mayor recorrido, tiempo de permanencia mayor), por lo que será más salina y su composición química puede ser muy diferente.

- Puntos de estancamiento: Zonas de la red de flujo que no están sometidas a ningún gradiente, por lo que el agua no se moverá, como el marcado en la ***figura 5*** con E.

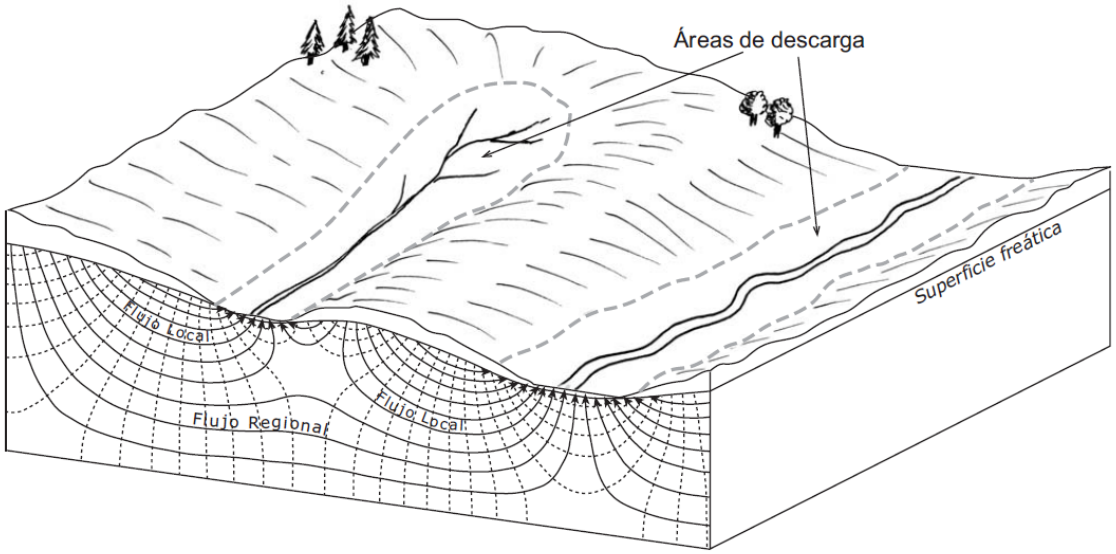
Figura 5. Red de flujo que esquematiza el flujo subterráneo natural en una región de conductividad hidráulica homogénea.



Fuente: UNIVERSIDAD DE SALAMANCA. Hidráulica subterránea: principios básicos. Pdf

Cabe decir, que se ha de tener presente que una sección vertical pertenece a una realidad tridimensional, por lo que la red de flujo que muestra la ***figura 5***, podría corresponder a este entorno:

Figura 6. Entorno de la red de flujo anterior



Fuente: UNIVERSIDAD DE SALAMANCA. Hidráulica subterránea: principios básicos. Pdf

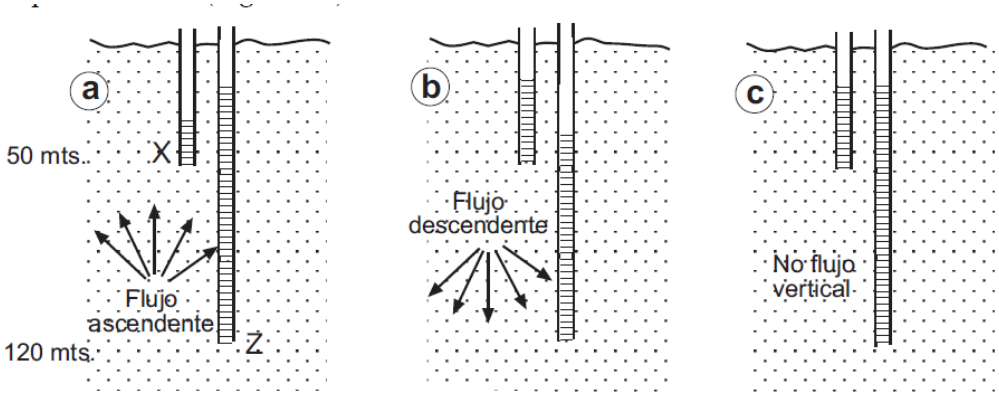
2.3.4 Flujo descendente y ascendente: áreas de recarga y descarga. En un caso real, no se dispone del esquema de la red de flujo que existe bajo en determinada región. Por ello para saber si se trata de una zona de recarga (flujo con componente vertical descendente), de descarga (flujo ascendente) o bien si el flujo subterráneo es horizontal, hay que medir el nivel en dos sondeos próximos abiertos a diferente profundidad, tal como lo indica la ***figura 7***.

En la ***figura 7a*** se aprecia que el potencial hidráulico en Z es mayor que en X, por lo que el flujo será ascendente, en alguna de las direcciones indicadas en las flechas.

En la ***figura 7b*** sucede lo contrario: el pozo menos profundo tiene más potencial que el profundo, entonces el flujo tendrá un componente vertical descendente.

Y en la ***figura 7c***, no existiría flujo vertical, porque los potenciales en el pozo somero y en el profundo son similares.

Figura 7. Observación de la componente vertical del flujo mediante dos sondeos próximos.

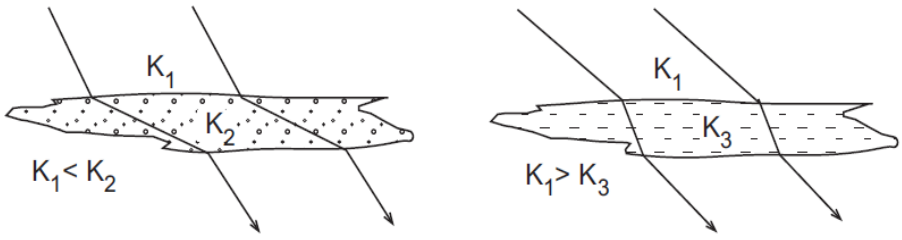


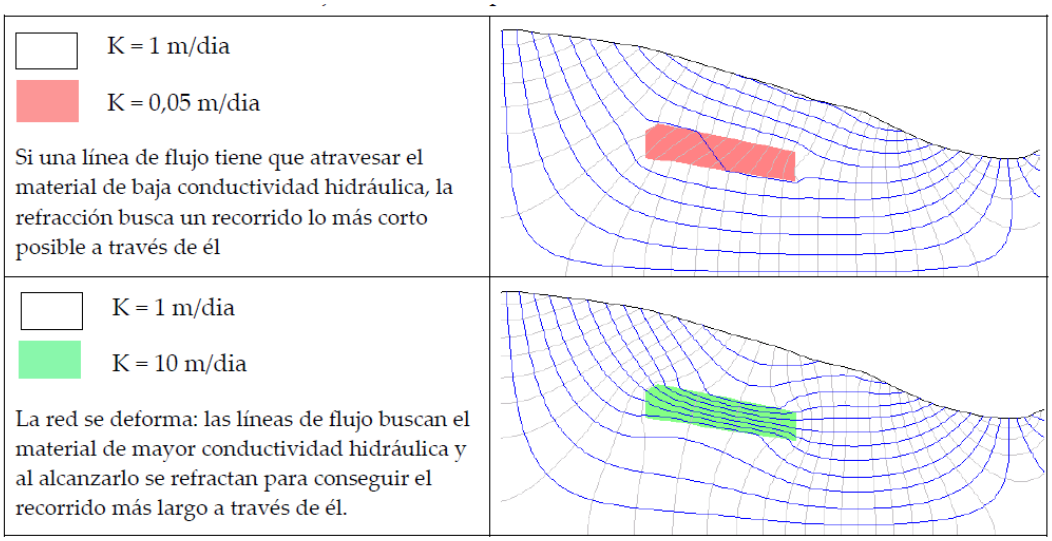
Fuente: UNIVERSIDAD DE SALAMANCA. Hidráulica subterránea: principios básicos. Pdf

Estas parejas de piezómetros indican la componente vertical del flujo; para conocer la componente horizontal hay que comparar varios niveles en sondeos de profundidad similar y distante, lo que se hará con mapas de isopiezas.

2.3.5 Medios heterogéneos. Cuando el medio no es homogéneo, el flujo cambia de dirección al pasar de un medio a otro de distinta permeabilidad, siguiendo un comportamiento similar a la refracción de la luz u otras ondas: se aleja de la normal si pasa a un medio de mayor permeabilidad, y viceversa, tal como se aprecia a continuación ***(figura 8)***:

Figura 8. Refracción de las líneas de flujo al pasar de un medio a otro de diferente conductividad hidráulica.

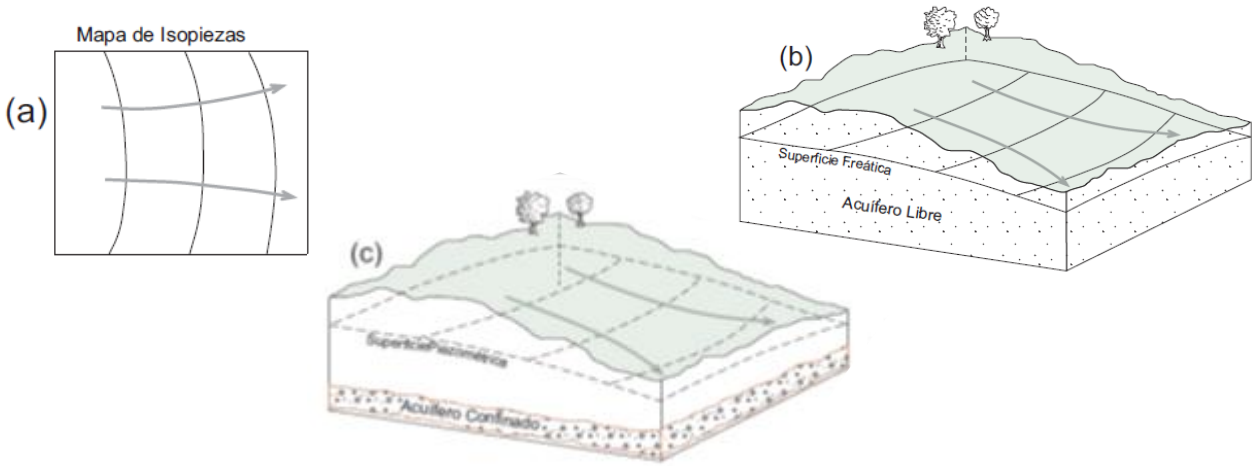




Fuente: UNIVERSIDAD DE SALAMANCA. Hidráulica subterránea: principios básicos. Pdf

1.3.5.1 Flujo horizontal: Mapas de isopiezas. Un mapa de isopiezas refleja la forma de la superficie freática o de la superficie piezométrica, según se trate de un acuífero libre o confinado. La superficie freática es una superficie real, que constituye el límite superior de la parte saturada del acuífero libre ***(figura 9b)***, mientras que en el acuífero confinado o semiconfinado **(figura 9c)**, la superficie piezométrica es una superficie virtual, definida por la altura a la que llegaría la columna de agua si existiera un piezómetro en cada punto.

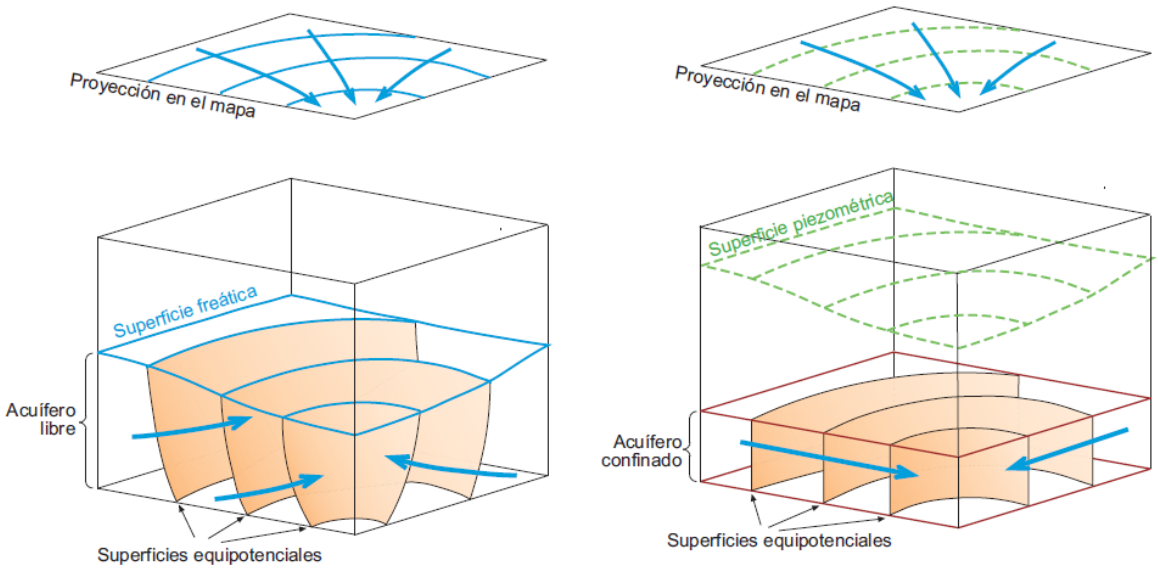
Figura 9. Representaciones del mapa de isopiezas.



Fuente: UNIVERSIDAD DE SALAMANCA. Hidráulica subterránea: principios básicos. Pdf

En el acuífero libre, las líneas isopiezas son las intersecciones de las superficies equipotenciales con la superficie freática ***(figura 10)***, mientras que en el confinado las superficies equipotenciales están, dentro del acuífero, por su parte la superficie piezométrica con sus curvas isopiezas, se encuentra varios metros por encima ***(figura 10)***.

Figura 10. Superficies equipotenciales en un acuífero libre con componente vertical de flujo y en un acuífero confinado con flujo horizontal.



Fuente: UNIVERSIDAD DE SALAMANCA. Hidráulica subterránea: principios básicos. Pdf

En ambos casos de este ejemplo esquemático, se generan idénticos mapas de isopiezas; el mapa es la representación del flujo tridimensional sobre un plano horizontal. En el acuífero confinado, las superficies equipotenciales son verticales, por lo que el flujo es horizontal; la representación de la realidad tridimensional sobre dos dimensiones (el mapa de isopiezas) no implica pérdida de información acerca del flujo en el acuífero.

En cambio, en el acuífero libre de este ejemplo, las superficies equipotenciales no son verticales, por lo que el flujo no es horizontal. El mapa de isopiezas refleja solamente una parte de la información: la componente horizontal del flujo. Se hace necesario entonces complementarlo con una red de flujo en un corte vertical.

Así mismo se hace necesario tomar determinadas precauciones como las que se describen a continuación:

- Todos los pozos o piezómetros deben estar abiertos en el mismo acuífero.
- Si se trata de un acuífero con una componente vertical apreciable, las medidas deberían ser próximas a la superficie freática, o al menos de profundidades similares.
- Las medidas deben tomarse en un lapso de tiempo breve, para que las variaciones temporales de los niveles no afecten a la distribución espacial de los mismos.

2.4 ACUÍFEROS

El acuífero es el medio rocoso en el que se mueve el agua subterránea. Generalmente cuando se aborda el concepto de acuífero, se describe como rocas que conducen cantidades de agua económicamente utilizables.

Otras definiciones, describen el acuífero como:

- Un almacén de agua subterránea.
- Un conductor de agua subterránea.
- Un medio de intercambio geoquímico.

Existen diferentes clasificaciones que se pueden dar de los acuíferos, a continuación, se describen algunas:

2.4.1 Según las características litológicas.

2.4.1.1 Acuíferos de poros. En su mayor parte se trata de sedimentos sueltos como gravas y arenas ***(Figura 14a)***.

2.4.1.2 Acuíferos de grietas. Rocas consolidadas como areniscas, calizas nocarstificadas, basaltos, granitos u otras rocas extrusivas e intrusivas, gneises ***(Figura 11b)***.

2.4.1.3 Acuíferos cársticos. Rocas carstificadas como calizas, dolomías y yeso. ***(Figura 11c)***.

Figura 11. Clasificación de los acuíferos

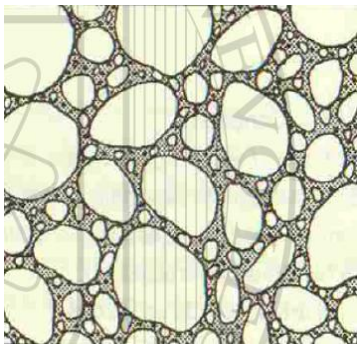


Figura 11a

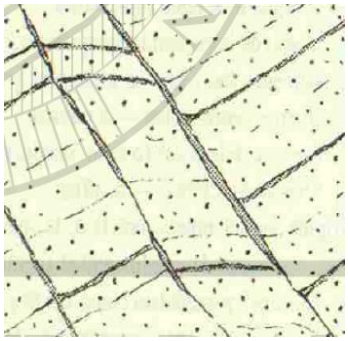


Figura 11b

Figura 11c

Fuente: UNIVERSIDAD DE SALAMANCA. Hidráulica subterránea: principios básicos.Pdf

- ***Figura 11a***. Acuíferos de poros: el agua se mueve en los poros.
- ***Figura 11b***. Acuíferos de grietas: el agua se mueve en las fracturas abiertas de origen tectónico o de intemperismo. El contenido de poros generalmente es despreciable.
- ***Figura 11c***. Acuíferos cársticos: de diámetros muy variables (canales, cavernas), el contenido de poros es despreciable.

Algunos acuíferos de grietas contienen además de su porosidad secundaria (de grietas), una permeabilidad y porosidad primaria no despreciable, que consiste en los poros intersticiales.

Un acuífero normalmente está delimitado hacia abajo por un sustrato de baja permeabilidad, además en muchos casos, existen también limites laterales, los cuales podrían ser pendientes de un canal de gravas o capas de baja permeabilidad adyacentes en posición tectónica más o menos vertical.

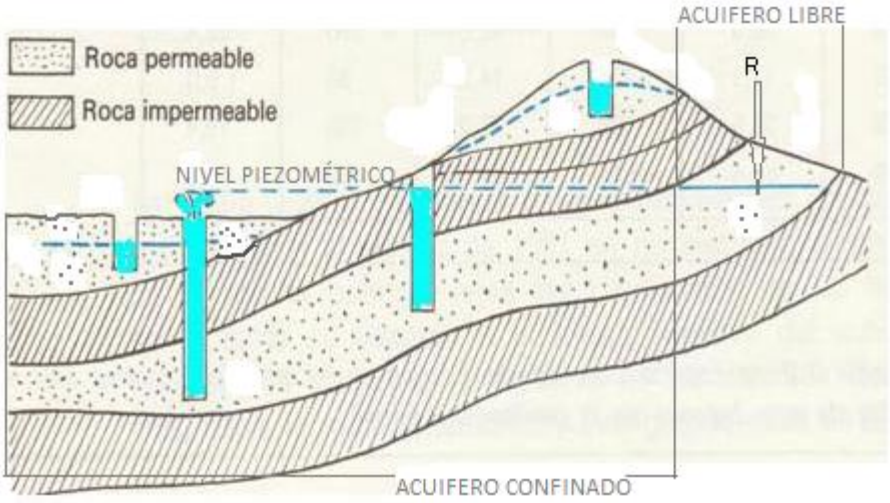
Es así que según sus límites los acuíferos se clasifican en:

2.4.1.4 Acuíferos no confinados o acuíferos libres sin techo confinante. Son aquellos en los que el nivel de agua se encuentra por debajo del techo de la formación permeable. Liberan agua por desaturación, es decir, el agua que ceden es procedente del drenaje de sus poros; la presión de estos acuíferos es igual a la presión atmosférica ***(Figura 12)***.

2.4.1.5 Acuíferos confinados, con techo confinante. Formado por capas de baja permeabilidad. Son aquellos cubiertos por una capa impermeable confinante. El nivel de agua en los acuíferos cautivos está por encima del techo de la formación acuífera. El agua que ceden procede de la expansión del agua y de la descompresión de la estructura permeable vertical, cuando se produce la depresión en el acuífero. En estos acuíferos el agua está sometida a una presión mayor a la de la atmosfera y ocupa todos los poros y huecos de la formación geológica saturándola totalmente. ***(Figura 12)***.

2.4.1.6 Acuíferos semiconfinados. Estos están confinados por capas semipermeables y se pueden considerar un caso particular de los acuíferos cautivos, en los que el muro, techo o ambos no son totalmente impermeables, sino que permiten una circulación vertical del agua ***(Figura 12)***.

Figura 12. Tipos de acuíferos



Fuente: UNIVERSIDAD DE SALAMANCA. Conceptos fundamentales de hidrogeología. Pdf

2.4.2 Según la movilidad del agua. Según la movilidad del agua, los acuíferos se clasifican así ***(tabla 3)***[13]:

2.4.2.1 Los acuíferos. Formación geológica que contiene agua en cantidad apreciable y que permite que circule a través de ella con facilidad, ejemplos: arenas, gravas. También granito u otra roca compacta con una fracturación importante.

2.4.2.2 Los acuicludos. Formación geológica que contiene agua en cantidad apreciable y que no permite que el agua circule a través de ella. Ejemplos: limo y arcilla. Un metro cubico de arcilla contiene más agua que el mismo volumen de arenas, pero el agua está atrapada, no puede salir por gravedad y por tanto no podrá circular en el subsuelo.

2.4.2.3 Los acuitardos. Formación geológica que contiene agua en cantidad apreciable, pero el agua circula a través de ella con dificultad. Evidentemente se

[13] UNIVERSIDAD DE SALAMANCA. Óp. Cit.

trata de un concepto intermedio entre acuicludo y acuífero. Ejemplos: arena arcillosa, areniscas, rocas compactas con alteración y/o fracturación moderadas.

2.4.2.4 Los acuifugos. Formación geológica que no contiene agua porque no permite que circule a través de ella. Ejemplos: granito, esquisto inalterados y no fracturados.

Tabla 3. Clasificación de acuíferos en base a su comportamiento hidráulico

Tipo	Capacidad almacenar	Capacidad de trasmitir	Capacidad de drenar	Formaciones características
Acuíferos	Alta	Alta	Alta	Gravas, arena, calizas diaclasadas
Acuitardos	Alta	Baja	Media/ baja	Limos, arenas, limosas, arcillosas
Acuicludos	Alta	Nula	Muy baja	Arcillas
Acuífugos	Nula	Nula	Nula	Granitos, gneises, mármoles

Fuente: UNIVERSIDAD DE SALAMANCA. Conceptos fundamentales de hidrogeología. Pdf

2.4.3 Hidrogeología. Estudia el almacenamiento, circulación y distribución de las aguas terrestres en las zonas saturadas y no saturadas de las formaciones geológicas, teniendo en cuenta sus propiedades físicas y químicas, sus interacciones con el medio físico y biológico y sus reacciones a la acción del hombre.

La propiedad de los acuíferos de contener agua está gobernada por varios factores: porosidad, permeabilidad, transmisibilidad específica y coeficiente de almacenamiento. Al conocer estas características se puede evaluar la magnitud del recurso y su aprovechamiento racional sin peligro a agotarlo.

2.4.4 Porosidad (n). Las rocas no son completamente sólidas, poseen grietas o espacios intergranulares al conjunto de estas aberturas o intersticios se le llama

porosidad. La porosidad por sí misma no define la existencia del acuífero, requiere que estos espacios estén interconectados; dicha característica además, se ve afectada por factores como: grado de comparación del material, forma y arreglo de la partícula y su gradación, las cuales son independientes del tamaño de las mismas.[14]

2.4.5 Permeabilidad (k). Es la propiedad de las rocas de permitir o no el flujo del agua; es decir, un estrato geológico siendo poroso puede contener agua, pero si los espacios vacíos no se interconectan, el agua no circula. Dicha libertad de movimiento depende del tamaño y forma de las partículas, gradación del material y viscosidad del agua. Generalmente las permeabilidades de los acuíferos fuertemente carstificados sobrepasan las de los acuíferos de poros, mientras que las permeabilidades de los acuíferos de grietas son más pequeñas que las de los acuíferos de poros.

2.4.6 Transmisibilidad o transmisividad. Es una medida de la capacidad de un acuífero para conducir agua o transmitir agua, definiéndose como el volumen de agua que pasa por unidad de tiempo, a través de una franja vertical de acuífero de ancho unitario, extendida en todo el espesor saturado, cuando el gradiente hidráulico es unitario y a una temperatura de 15°C.

La transmisividad es el producto de la conductividad hidráulica y el espesor saturado del acuífero. Para un acuífero compuesto de muchos estratos, la trasmisividad total es la suma de la transmisividad de cada estrato.

[14] COLLAZO, María Paula y MONTAÑO Jorge. Manual de agua subterránea. Montevideo: Ministerio de ganadería, agricultura y pesca. 121 p. 2012.

2.4.7 Coeficiente de almacenamiento y rendimiento específico. Las propiedades geohidráulicas más importantes de un acuífero son:

- Transmitir agua, con parámetros como: permeabilidad, conductividad hidráulica y transmisividad.
- Almacenar agua, con parámetros como: capacidad de almacenamiento (coeficiente de almacenamiento), porosidad, rendimiento específico.

El coeficiente de almacenamiento a diferencia de la porosidad, se refiere al volumen que es capaz de liberar el acuífero al descender en una unidad el nivel piezométrico (o la presión).

En acuíferos confinados los valores típicos se encuentran entre 0.00005 y 0.005, mucho menores que la porosidad eficaz de un acuífero libre. Esto se debe a que en un acuífero confinado el agua no es liberada por el drenaje de los intersticios sino por la compresión del acuífero, en particular de las capas de arcillas y limos intercaladas, (por eso también denominado coeficiente de almacenamiento elástico), y todo el material acuífero permanece saturado.

3. GENERALIDADES Y TRATAMIENTO DEL AGUA DE PRODUCCIÓN

Para comprender las características físicas y químicas de las aguas de formación y establecer cuál será el mejor tratamiento a utilizar a la hora de ejecutar un proyecto de inyección, se debe conocer su origen, el tipo de yacimiento, sus características, sus componentes físicos-químicos, las facilidades de producción, entre otros factores importantes, que deben ser analizados y estudiados a profundidad; este capítulo muestra las generalidades y los tratamientos previos a considerar antes de realizar una inyección y almacenamiento de las aguas residuales del petróleo, teniendo en cuenta que todas las aguas de producción su composición físico-química varía de acuerdo a su localización, tipo de roca y yacimiento, por lo que los tratamientos y componentes a tratar pueden variar.

3.1 GENERALIDADES DEL AGUA DE PRODUCCIÓN

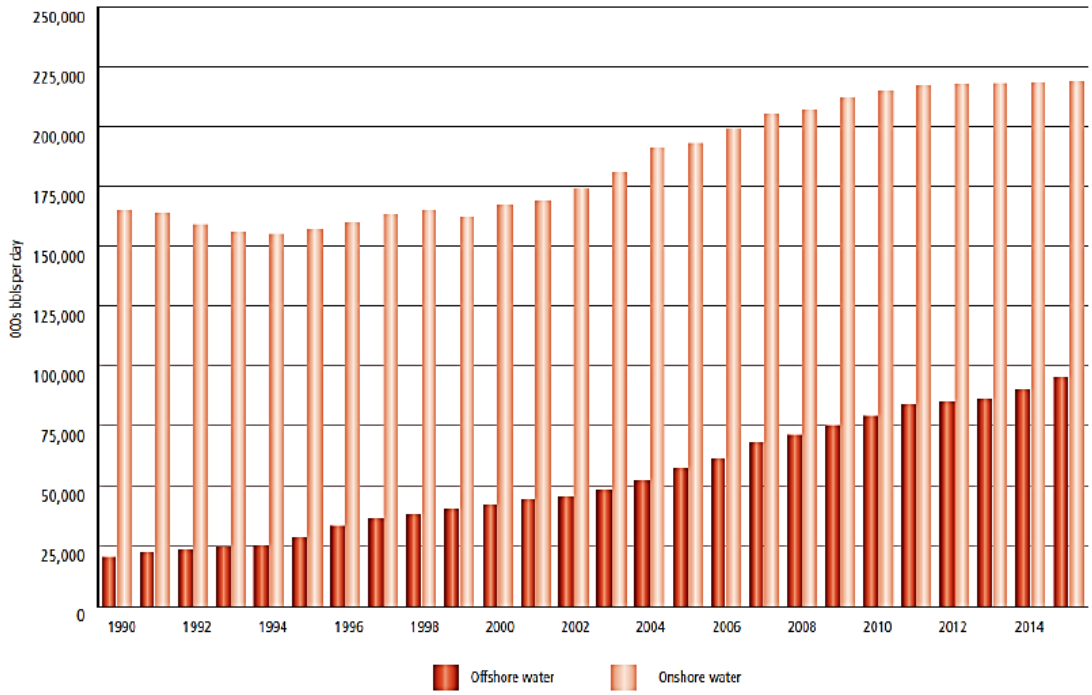
3.1.1 ¿Qué es el agua de producción? En las formaciones del subsuelo, las rocas están impregnadas con fluidos como el agua de formación, petróleo, o gas (o alguna combinación de estos fluidos). Se cree que, en la roca, en la mayoría de las formaciones petrolíferas fue saturada con agua y atrapada por el oíl. Los hidrocarburos menos densos migran para tomar posiciones, desplazando un poco al agua de formación, dando lugar a un yacimiento de hidrocarburos.

La producción global de agua depende del tipo de yacimiento, los mecanismos de producción o de desplazamiento, la calidad del completamiento, entre otros factores y se pronostica que en on-shore se encuentra actualmente en 220 billones de barriles al año[15]. De acuerdo al American Petroleum Institute (API), cerca de 18 billones de barriles (bbl) de agua coproducida con petróleo se

[15] DAL FERRO, Benoit y SMITH, Michael. Global offshore and offshore water production. Douglas-Westwood Ltd. 4 Sept 2009.

generaron en Estados Unidos en 1995 en operaciones on-shore. Se tiene un corte de agua de producción promedio de 70% en la industria petrolera mundial.[16]

Figura 13. Producción global de agua (Onshore y offshore)



Fuente: Energy Files Ltd. (Dal Ferro y Smith 2007).

3.1.2 Características de aguas de formación. El agua de formación no está constituida por una sola materia. Sus propiedades fisicoquímicas varían bastante según la posición geográfica del campo. La formación geológica con la cual el agua de formación ha estado en contacto por miles de años dando un tipo de producto de hidrocarburo especifico, así como las propiedades del agua de producción y su volumen pueden variar hasta en los diferentes sitios de un mismo yacimiento.

[16]Magazine Oilfield Review - Schlumberger. Manejo de la producción de agua: de residuo a recurso. Spring 2000.

3.1.3 Operaciones de producción. La producción requiere que los fluidos que ingresan al pozo encuentren condiciones favorables para fluir hacia la superficie donde son procesados, separados y despachados al mercado.

Conforme continua la producción, la presión en el reservorio y en los alrededores de los pozos de producción disminuye, pero la producción de agua producida se incrementa.

Se produce el movimiento de fluidos dentro del reservorio y el contacto establecido entre el petróleo y el agua es perturbado. Los movimientos de fluidos que se presentan en el reservorio producen el cambio de contactos del petróleo con el agua.

En resumen, todos los pozos producen agua, cuya cantidad varía desde muy pequeña hasta varias veces el volumen de petróleo en los últimos periodos de vida del campo petrolífero. Los pozos de gas también producen agua, aunque por lo general, las cantidades son considerablemente más pequeñas que en los pozos de petróleo.

3.1.4. Componentes primarios del agua de producción. Los componentes primarios de las aguas producidas dependen del agua específica que se produce, y los componentes que se muestran en un análisis, a menudo dependen de la razón por la cual se realiza el análisis del agua. La mayoría de los componentes han sido estudiados en forma extensa e individualmente en varias oportunidades por muchas razones. Estos estudios han sido resumidos y son descritos con bastante detalle[17].

Los componentes normales y las propiedades de los mismos que se miden en el laboratorio son:

[17] Components of Produced Water: A Compilation of Results From Several Industrial Studies, MT Stevenson, Texaco Inc., SPE Paper 23313. Presented at the First International Conference on Health, Safety and Environment held in The Hague, Netherlands, Nov 1991.

Tabla 4. Componentes primarios del agua de producción**.**

Cationes	Aniones	Otras propiedades
Calcio(Ca^{++})	Cloruro(Cl^{-})	pH
Magnesio(Mg^{++})	Carbonato($CO3^{--}$)	Sólidos en suspensión - cantidad, tamaño, forma, composición
Sodio(Na^{+})	Bicarbonato($HCO3^{-}$)	Turbidez
Hierro(Fe^{+++})	Sulfato($SO4^{--}$)	Temperatura
Bario(Ba^{++})		Peso específico
Estroncio(Sr^{+++})		Oxígeno disuelto
Radio(Ra^{+++})		Fenoles
		H2S
		Conteo bacteriano
		Contenido de petróleo

Fuente: Modificado de Arpel, Guía Ambiental de ARPEL No. 1, Guía Para La Disposición Y El Tratamiento De Agua Producida, Javier de viana 2345 CP 11200 Montevideo Uruguay.

Además, se acostumbra medir la concentración de los sólidos disueltos totales (TDS) la cual es simplemente la suma de las concentraciones de todos los iones individuales.

3.2 PROBLEMAS AMBIENTALES ASOCIADOS AL AGUA DE PRODUCCIÓN.

El agua producida contiene cantidades variables de sales y gases disueltos (CO, CO2, H2S). Puede haber algunos sólidos en suspensión que pueden contener trazas de metales pesados y, posiblemente, niveles excesivos de radiación en el estroncio y el radio. Generalmente, antes del tratamiento, el agua producida contiene niveles demasiado altos de gotitas de petróleo suspendidas y emulsificadas. Generalmente las salmueras de yacimientos petrolíferos no son aptas para el consumo humano ni para el uso de los animales. El agua producida también puede aparecer relativamente clara y a menudo es difícil distinguirla de otras aguas.

3.2.1 Fuentes de agua potable. Uno de los mayores problemas potenciales del agua de producción es la contaminación de las fuentes de aguas potables. La mayoría de las aguas potables mundiales se hallan bajo tierra, pero a pocos metros de la superficie, o en ríos y arroyos. La mayoría de estos acuíferos son alimentados por filtración desde la superficie, y son muy susceptibles a la contaminación por otros fluidos. El agua producida es un contaminante ideal de la misma gravedad específica que la capa acuífera, potencial fuente de alimentación de la capa freática, con una movilidad equivalente y fácilmente mezclable con el agua dulce de la capa freática.[18]

La preocupación por las fuentes de agua potable ha enfocado la atención pública sobre la forma en que compañías eliminan al agua de producción. Ahora, las evaluaciones económicas deben considerar el costo de eliminación de agua como un costo básico de producción que no se puede dejar a la libre discreción.

3.2.2 Volúmenes de agua de producción. Cuando comienza la producción, los volúmenes iniciales de agua generalmente son bajos, y muchas veces es tentadora la idea de descargar el fluido en las cercanías sin ejercer ningún control. Esto es totalmente inaceptable. Es extremadamente improbable que los volúmenes disminuyan, excepto bajo circunstancias poco comunes. Si se está produciendo en varias zonas es posible que una reconstrucción de pozo pueda demorar o postergar la producción de agua, pero en la mayoría de las zonas la permeabilidad relativa de la roca al agua asegura que una vez que ocurre la irrupción la producción de agua no solo continuará, sino que aumentará.

De hecho, es bastante normal que la relación agua-petróleo aumente muy rápidamente inicialmente una o más veces. Después de este "estallido" inicial la relación agua-petróleo aumenta en forma cada vez más paulatina, a medida que la

[18]Standards and Enforcement for Air and Water Pollution Control, US Environmental Protection Agency, March 1973, Washington, DC, 20460.

saturación de agua en la vecindad del pozo continúa aumentando. Eventualmente el costo de sacar, manejar, procesar y eliminar el agua, adicionado al bajo nivel de producción de petróleo, hace que la operación de un pozo deje de ser económica.

Este nivel de producción de agua es enorme, y el potencial de contaminación por tales volúmenes se está volviendo una preocupación mayor.

3.2.3 Sales y sólidos en suspensión. El agua producida contiene una gran variedad de sales disueltas (como cationes y aniones), sólidos suspendidos y gases. Algunos son simplemente objetables mientras otros son tóxicos y pueden concentrarse en la cadena alimenticia.

Los efectos de varios de los compuestos e iones más comunes sobre las aguas dulces de superficie se indican a continuación:

3.2.3.1 Sodio y Cloruros. Los estándares para agua potable de los Estados Unidos de Norte América permiten hasta 250 mg/l de sodio, 250 mg/l de cloruros y un contenido total de sólidos disueltos de 500 mg/l. No se admiten niveles por encima de éstos en fuentes de agua potables, y las metas propuestas deberían ser mucho menores digamos unos 100 mg/l. El sodio en particular es perjudicial para la calidad del agua, sobre todo cuando se la usa para la irrigación, ya que su evaporación conduce a una acumulación severa y dañina de sal.

Cuando el sodio se combina con sulfatos también causa problemas de salud (diarrea) y espuma en las calderas.

3.2.3.2 Sólidos en Suspensión. Esta es una medida del material que excede el tamaño coloidal. Estos sólidos interfieren con la autopurificación, conducen a los depósitos de lodos, dañan las pesquerías y dan mal aspecto.

3.2.3.3 Metales Pesados. El metal pesado primario en el agua producida es el bario, pero pueden presentarse vestigios de mercurio, arsénico y selenio. Estos

elementos son extremadamente tóxicos para los seres humanos aún en cantidades pequeñas, y son concentrados por varios organismos - los crustáceos particularmente. Las concentraciones máximas deben ser menores de 1 mg/l.

3.2.3.4 Sulfuros. Los sulfuros matan a los peces, producen sabor y olor y son perjudiciales para el uso en procesos industriales. Se recomiendan niveles máximos permisibles de 0.5 mg/l.

3.2.3.5 Aceites y Grasas. Los aceites y grasas son tóxicos para los peces, reducen la aireación, producen sabor y son estéticamente inaceptables. Los límites para la descarga en el océano abierto varían desde 30 mg/l en Australia hasta 40 mg/l (promedio) en aguas del Mar del Norte y de los Estados Unidos. Se puede anticipar que todos estos límites han de disminuir, y todas las plantas nuevas de tratamiento deberían anticipar dicha reducción y ser diseñadas para una cifra menor. Se sugiere 25 mg/l.

3.2.3.6 Radioactividad. Tanto el Radio 226 como el Estroncio 90 son radioactivos y a menudo se presentan en el agua producida. Ambos son concentrados por los mismos organismos que concentran a los otros metales pesados. Los crustáceos son especialmente significativos para los seres humanos. Los niveles máximos recomendados son una Beta total de 1000 pCi/l, menos de 3 pCi/l de Radio 226, y menos de 10 pCi/l de Estroncio 90.

3.2.3.7 Concentración Salina. La mayoría de las aguas producidas contienen concentraciones salinas muy altas. Se encuentran niveles de cloruro de 150,000 a 180,000 ppm (el agua de mar tiene aproximadamente 35,000 ppm). A estos niveles el agua producida es tóxica para casi todas las formas de vida.

3.2.3.8 Temperatura. La temperatura de los yacimientos es una función de la profundidad. Las temperaturas de las aguas producidas reflejan la temperatura del yacimiento, la tasa de flujo, la geometría del agujero del pozo, la temperatura

ambiente y el método de procesamiento en la superficie. En el punto de eliminación las aguas producidas tienen todavía temperaturas elevadas. Las descargas en aguas de superficie elevarán su temperatura y este cambio disminuirá los niveles de oxígeno disuelto, causando un gran efecto a las especies. Se recomienda no exceder una elevación máxima de temperatura de 3°C por encima de una línea de base para la temporada en las aguas receptoras.

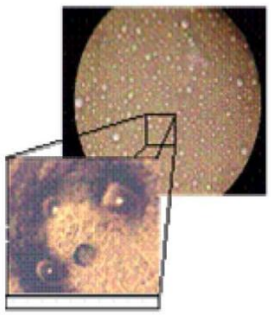
3.3 TRATAMIENTO Y ACONDICIONAMIENTO DEL AGUA DE PRODUCCIÓN PARA LA INYECCIÓN

3.3.1 Deshidratación de crudos. La deshidratación de crudos es el proceso mediante el cual se separa el agua asociada con el crudo, ya sea en forma emulsionada o libre, hasta lograr reducir su contenido a un porcentaje previamente especificado. Generalmente, este porcentaje es igual o inferior al 1 % de agua.

Una parte del agua producida por el pozo petrolero, llamada agua libre, se separa fácilmente del crudo por acción de la gravedad, tan pronto como la velocidad de los fluidos es suficientemente baja.

La otra parte del agua está íntimamente combinada con el crudo en forma de una emulsión de gotas de agua dispersadas en el aceite, la cual se llama emulsión agua/aceite (W/O), como se muestra en la ***Figura 14***.

Figura 14. Microfotografía de una emulsión agua en petróleo



Fuente: Paper Tratamiento Deshidratación de Crudo Parte 1, Universidad de Los Andes.

3.3.2 Tratamiento de emulsiones. En la industria, las emulsiones deben ser separadas casi completamente antes que el aceite sea transportado y procesado, y cumplir de ésta manera con especificaciones de calidad, buscando una tasa rápida de separación y valores bajos de agua contenida en aceite. El tratamiento de las emulsiones busca neutralizar de alguna manera la acción del agente emulsificante, destruyendo la película interfacial o venciendo las fuerzas repulsivas que impiden la unión de las gotas dispersas.

Los tratamientos convencionales incluyen separadores de agua libre, separadores de tres fases y tratadores para quitar el agua del aceite y establecer una corriente de agua primaria.

Para cumplir con los requerimientos de descarga se necesitan tanques desnatadores, interceptores de placas paralelas, celdas de flotación por gas, coalescedores, hidrociclones, entre otros.[19] Estos se describen a continuación.

3.3.2.1 Tratamiento Térmico. Calentando la emulsión se optimiza su rompimiento y separación. Se reduce la viscosidad del aceite, aumenta la tasa de asentamiento del agua y la frecuencia de coalescencia entre las gotas dispersas, desestabiliza la película interfacial.

Sin embargo, tiene efectos negativos, como el alto costo, y la pérdida de componentes livianos del crudo, reduciendo la gravedad API.

3.3.2.2 Tratamiento Eléctrico. Se basa en aplicar un campo eléctrico a alto voltaje, lo cual causa los siguientes fenómenos:

- Las gotas se polarizan y tienden a alinearse entre ellas con las líneas de la fuerza eléctrica.

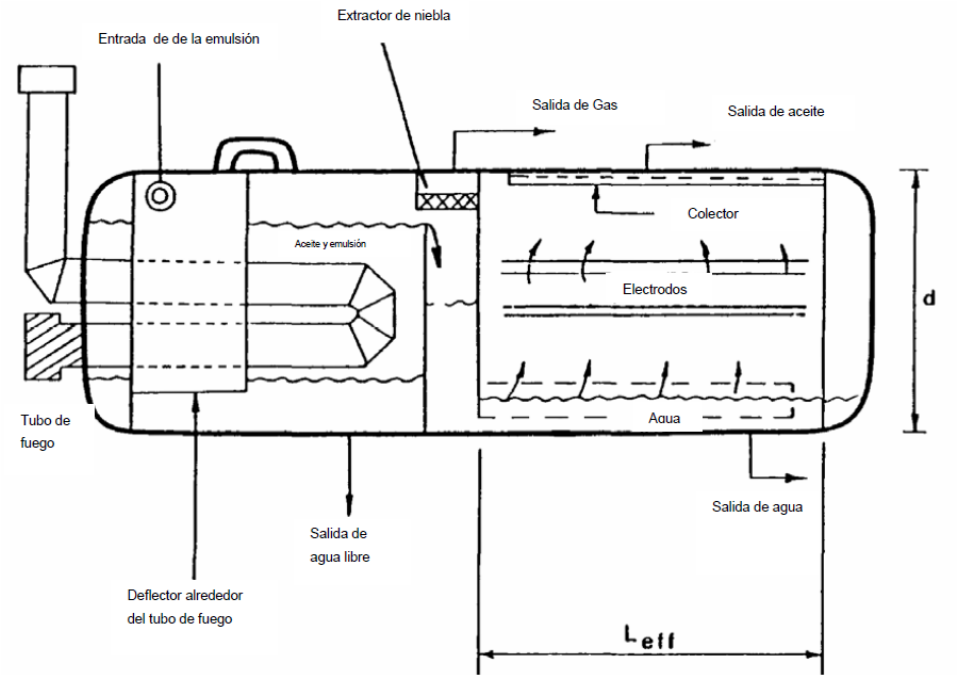
[19] K, Simms, S Kok, A, Zaidi, Alternative Processes for the Removal of Oil from Oilfield Brines, Environment Canada, Wastewater Technology Centre, Burlington, New Orleans, Louisiana, Sponsored by U.S. EPA. 1990.

- La atracción eléctrica atrae a las gotas causando la coalescencia.
- El campo eléctrico tiende a distorsionar la película interfacial alrededor de las gotas de agua.

El campo eléctrico causa el rápido movimiento de las gotas en diferentes direcciones, lo cual ayuda a que colisionen entre ellas, permitiendo que ocurra la coalescencia.

Un sistema eléctrico consiste en un transformador y electrodos que proveen corriente alterna a alto voltaje. Los electrodos son colocados de tal manera que proveen un campo eléctrico perpendicular a la dirección del flujo. La distancia entre los electrodos en algunos diseños es ajustable para que el voltaje pueda variar para cumplir con los requisitos de la emulsión a ser tratada. En la ***figura 15*** se muestra el diseño típico de un tratador electroestático.

Figura 15. Diagrama de un separador electroestático



Fuente: Arnold, Ken y Stewart, Maurice. Surface Production Operations. Design of Oil -Handling Systems and Facilities. Primera Edición. 1999.

3.3.2.3 Tratamiento Gravitacional. Muchos de los equipos dependen de la gravedad para separar las fases de agua y crudo, la ley de Stokes describe el proceso.

$$V_t = \frac{1{,}78 * 10^{-6}(\Delta S.G) d_m^2}{\mu}$$

Dónde:

- V_t= Velocidad de asentamiento de las gotas de agua relativa a la fase continua de aceite, pies/seg
- dm= Diámetro de la gota de agua, micrón
- ΔS.G.= Diferencia de gravedad específica entre el aceite y el agua.
- μ= Viscosidad dinámica de la fase continua de aceite, cp.

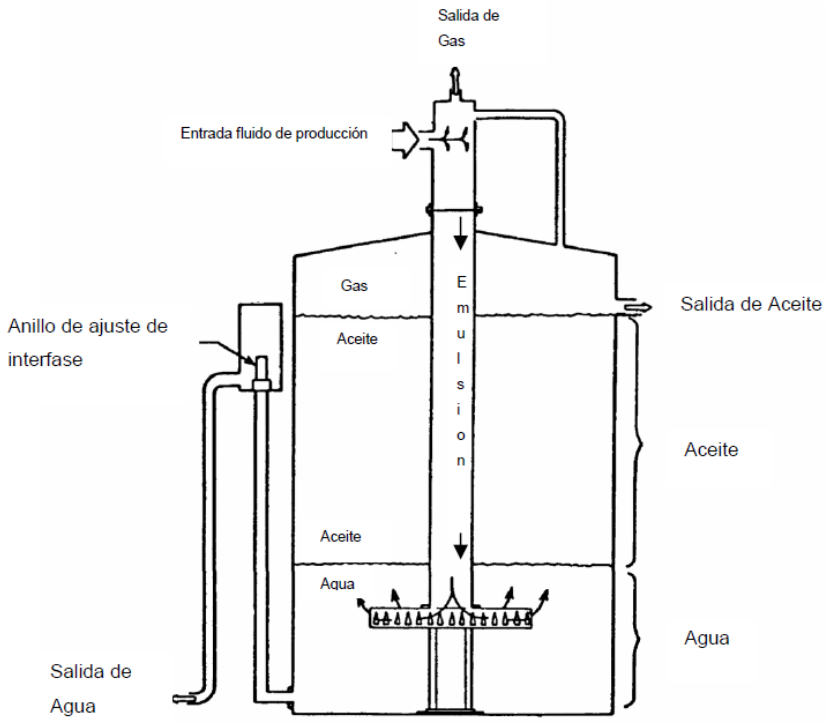
Entre mayor sea el tamaño de gota, mayor será el cuadrado de su diámetro, y mayor la velocidad de asentamiento, lo que indica que entre más grande sean las gotas, menos tiempo tomará el asentamiento a la base del tanque y más fácil el tratamiento del aceite.

Entre mayor sea la diferencia de densidades entre las gotas de agua y la fase de aceite, será mayor la velocidad de asentamiento. Entre más liviano sea el crudo, será más fácil tratarlo. A mayor temperatura, menor viscosidad del aceite y mayor velocidad de asentamiento.

El asentamiento gravitacional se lleva a cabo en grandes recipientes llamados tanques, sedimentadores, tanques de lavado, “gun barrels” y eliminadores de agua libre o free water knockout (FWKOS).[20]

[20] LANDAZÁBAL PINZÓN, Gustavo A., INFANTE MORENO, Marlon R. Definición de Estándares Operacionales para el Tratamiento de Aguas Residuales, pág. 23, 2007.

Figura 16. Diagrama Gun barrel



Fuente: Arnold, Ken y Stewart, Maurice. Surface Production Operations. Design of Oil -Handling Systems and Facilities. Primera Edición. 1999.

3.3.2.4 Tratamiento Químico. Consiste en agregar a la emulsión ciertas sustancias químicas, llamadas desemulsificantes, las cuales atacan la sustancia emulsificante y neutralizan su efecto para promover la neutralización de la emulsión.

Los desemulsificantes tienen tres acciones principales:

1) Fuerte atracción hacia la interfase aceite-agua; ellos deben desplazar y/o neutralizar a los emulsificadores presentes en la película de la interfase.

2) Floculación: neutralizan las cargas eléctricas repulsivas entre las gotas dispersas, permitiendo el contacto de las mismas.

3) Coalescencia: permiten que pequeñas gotas se unan a gotas más grandes que tengan suficiente peso para asentarse. Para esto se requiere que la película que rodea y estabiliza las gotas sea rota.

Los productos químicos desemulsificantes pueden caracterizarse así:

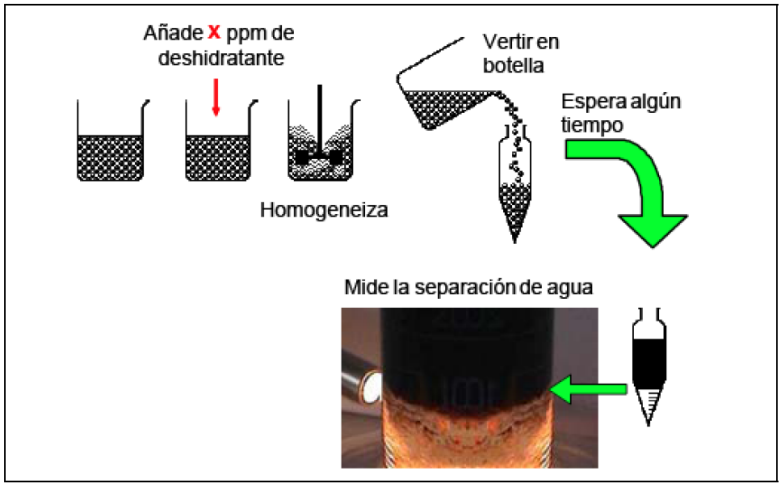
- Esteres, son buenos deshidratadores, provocan un asentamiento lento de las gotas de agua, pero al sobredosificarse provocan emulsiones inversas (o/w).
- Di-epóxicos, son excelentes deshidratadores, pero provocan un asentamiento lento de las gotas de agua.
- Uretanos, buenos deshidratadores, provocan un asentamiento lento de las gotas de agua.
- Resinas, son buenos deshidratadores, provocan un asentamiento rápido de las gotas de agua, dan un agua separada limpia.
- Polialquilenos, pobres deshidratadores, lento asentamiento de las gotas de agua glicoles, requiere mezclarse con otros para aplicarse.
- Sulfonatos, buenos humectantes de sólidos y tiene capacidad para el asentamiento de las gotas de agua, sobredosificandose no causa emulsiones inversas (o/w), pero pueden causar la precipitación de partículas de sulfuro de hierro en el agua separada.
- Poliesteraminas, agentes de superficie activa violentos, deshidratan en bajas dosificaciones, al sobredosificarse producen emulsiones inversas (o/w).
- Oxialquilados, buenos agentes humectantes, son usados en mezclas.
- Poliaminas, son lentos en el asentamiento de las gotas de agua.
- Alcanolaminas, son rápidos en el asentamiento de las gotas de agua.

Un solo compuesto químico no puede proveer las tres acciones requeridas nombradas anteriormente, por lo que los desemulsificantes comerciales son una mezcla de varios desemulsificantes básicos (30-60 %) más la adición de solventes

adecuados, tales como nafta aromática pesada, benceno, tolueno o alcohol isopropílico para obtener un líquido que fluya a la menor temperatura esperada.

Los desemulsificantes son insolubles en agua y muy solubles en aceite para que puedan difundirse rápidamente a través de la fase de aceite y alcancen las gotas de agua.[21]

Figura 17. Procedimiento para la realización de la prueba de botella



Fuente: Paper Tratamiento Deshidratación de Crudo Parte 2, Universidad de Los Andes, Lab. Formulación, Interfaces, Reología y Procesos.

3.3.3 Remoción del petróleo disperso. El aceite en el agua producida es un problema importante. Actualmente, los niveles aceptados de aceite y grasa en el agua a ser descargados están en un promedio de 40 mg/l con una concentración máxima en una muestra de 72 mg/l. Estos niveles, sin lugar a duda, se restringirán.

El aceite también puede causar problemas pozo abajo en el sistema de inyección, especialmente donde se está utilizando un pozo de eliminación en una zona que

[21] KOKAL, Sunil. Crude oil emulsions: A state of art review, Saudi Aranco. SPE paper 77497 (2002).

no contenía petróleo y no tiene saturación de aceite residual. El aceite también ensuciará rápidamente a la mayoría de los filtros.

Por lo tanto, se deberá minimizar el aceite en el agua. Si la concentración de aceite en el agua que sale de los separadores de agua libre es demasiado alta, se deberá considerar el uso de un tratador u otra forma de quitar el aceite. Si el agua del tratador contiene altas concentraciones de aceite y un control muestra que el tratador está operando óptimamente, entonces se necesitará tratamiento adicional.[22]

3.3.3.1 Tanques Desnatadores. Los tanques desnatadores son simplemente recipientes grandes que proporcionan el tiempo de retención necesario para que el aceite suba a la superficie donde puede ser desnatado y recogido. Estas unidades, que pueden ser a presión o atmosféricas, son diseñadas para proporcionar un alto tiempo de retención durante el cual pueda ocurrir la coalescencia y la separación gravitacional.[23]

Los desnatadores pueden ser horizontales o verticales. En los verticales las gotas de aceite deben ascender en sentido contrario al flujo de agua que es descendente; algunos desnatadores verticales poseen propagadores en la entrada y colectores en la salida para ayudar a la distribución de flujo uniforme.

Los tanques horizontales son más eficientes para el tratamiento de agua porque las gotas de aceite no tienen que fluir contra la corriente de flujo del agua. Sin embargo, los verticales se usan donde se presente lo siguiente:

---

22 ARPEL, Guía Ambiental No. 1, Guía Para La Disposición Y El Tratamiento De Agua Producida, Javier de viana 2345 CP 11200 Montevideo Uruguay. 2001.

23 Castro Castell, Martha Rocío. Estado del Arte de Sistemas de Tratamiento de Aguas de Producción en Campos Petroleros, 2004.

- Donde se necesita manejar arena y sólidos: Esto puede hacerse en verticales con desagües o drenajes de arena en el fondo del mismo; sin embargo, estos drenajes en tanques horizontales no han sido satisfactorios.
- Donde se experimenta movimiento de líquidos: Las cámaras verticales son menos susceptibles a que se produzcan cierres en los niveles altos debido al movimiento de líquidos. Las olas y ondas internas que surgen en los tanques horizontales pueden dispersarse e igualar el nivel flotante, aunque el volumen de líquido entre en nivel de operación normal y el nivel alto de cierre sea igual o mayor que el de un tanque vertical.

3.3.3.2 Separadores de placas paralelas. El separador de placas paralelas es un separador por gravedad que consiste en una pila de placas paralelas separadas por un espacio de 4 a 10 cm. El agua aceitosa pasa entre las placas y las partículas de aceite suben a la superficie de la placa superior donde coalescen. El aceite aglutinado se traslada por la placa hasta llegar a la superficie de agua, donde se desnata. Básicamente, las placas paralelas reducen la distancia que debe viajar el aceite antes de llegar a una superficie donde puede coalescer. El espaciamiento entre las placas es muy importante en el diseño.

Existen dos tipos básicos de coalescedor de placa paralela - el interceptor de placa paralela y el separador de placa inclinada. El separador de placa inclinada utiliza una pila de placas inclinada a 45°.

Los separadores de placa inclinada son utilizados frecuentemente costa afuera donde los niveles de espaciamiento y peso son muy restrictivos.

3.3.3.3 Celdas de flotación con gas. En una celda de flotación con gas se forman burbujas finas de gas en el agua que se adhieren a las gotitas de aceite, levantándolas a la superficie para ser recogidas. Las características principales son la introducción de burbujas finas de gas dispersadas en el fluido, una zona de turbulencia mínima y un medio de colección.

En el sistema de **Flotación con Gas Disuelto**, el gas se disuelve por presión en el agua y se libera a presión más baja en el recipiente de flotación. Estas unidades son muy grandes y no funcionan tan bien como las unidades de gas disperso.

En el sistema de **Flotación con Gas Disperso** el gas es dispersado en el agua utilizando un rotor mecánico o un eyector. El tipo de eyector usa menos energía y menos gas que el rotor y tiene una relación de gas-agua de alrededor de 10 pies cúbicos por barril.

Los resultados están influenciados por la concentración de gas, la salinidad, la temperatura, el pH, el tipo de crudo, la concentración de aceite, y los aditivos químicos para flotación. Son comunes las recuperaciones de aceite de más del 90%.

3.3.3.4 Coalescedores. Los coalescedores son recipientes que tienen una gran superficie. A medida que el agua aceitosa fluye, las gotitas de aceite finamente dispersas coalescen hasta tener el tamaño suficiente como para flotar hacia la superficie y ser recogidas.

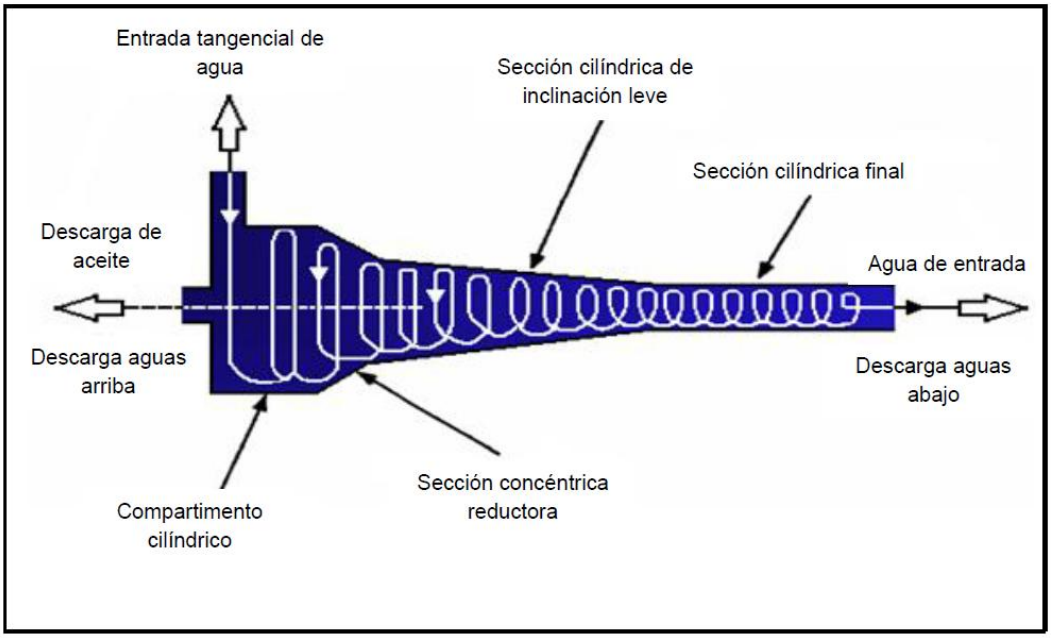
Los Coalescedores de Medios Granulares usan sistemas de flujo ascendente y descendente similares a filtros. Frecuentemente se utilizan los mismos medios.

El poliuretano es usado en forma de un paquete mojado en aceite. El aceite y los sólidos mojados en aceite se juntan sobre el paquete de poliuretano y se retiran automáticamente. A medida que se junta el aceite la caída de presión a través de la unidad aumenta y se requiere la regeneración. La regeneración se hace comprimiendo y expandiendo alternativamente el paquete y colectando los fluidos exprimidos.

3.3.3.5 Hidrociclones. Este tipo de unidades utiliza la fuerza centrífuga para remover las gotas de aceite presentes en el agua ***(figura 18)***. El flujo entra al compartimiento de forma tangencial creando un remolino de alta velocidad, en el

cual las gotas de aceite coalescen y fluyen en contracorriente. A medida que el fluido pasa a través de las secciones concéntricas de reducción (alto grado de inclinación) y decreciente (con ángulo de inclinación leve), se produce un incremento en la velocidad. Luego, el fluido ingresa a una sección cilíndrica donde el caudal se mantiene constante. Las partículas de mayor tamaño son separadas en la sección decreciente, mientras que las partículas más pequeñas, son removidas en la sección final. Las partículas de aceite al tener menor densidad son arrastradas por la fuerza centrífuga hacia la zona de baja presión generada en el centro del cilindro, en donde fluyen en dirección contraria al flujo. El aceite es removido a través de un puerto de diámetro pequeño ubicado en la cabeza del hidrociclón, mientras que el agua sale por la parte baja del equipo.[24]

Figura 18. Partes de un hidrociclón



Fuente: ARTERBURN, Richard A. The sizing and selection of hydrocyclones, pag.10.

[24] Arnold, Ken y Stewart, Maurice. Surface Production Operations. Design of Oil -Handling Systems and Facilities. Primera Edición. 1999.

Los hidrociclones son excelentes dispositivos coalescedores, funcionan como un elemento de tratamiento primario seguido por un desnatador ó skimmer.

Entre algunas ventajas de los hidrociclones estáticos se encuentran:

- No poseen partes móviles, por lo tanto, no se requiere mayor atención a la operación y mantenimiento.
- Diseño compacto, reduce requisitos de peso y espacio comparados con las unidades de flotación.
- Son estables al movimiento.
- Su diseño modular permite manejar volúmenes mayores de flujo.
- Costos de operación más bajos comparados con las unidades de flotación.

Las desventajas incluyen la necesidad de instalar una bomba si el aceite entra a la unidad a una presión por debajo de la presión mínima de operación y la tendencia del puerto de descarga a taponarse con arena y/o escamas. La arena en el agua producida causará la erosión de los conos e incrementará los costos de operación.

3.3.4 Remoción de gas disuelto. Las plantas de tratamiento de agua se clasifican un tanto arbitrariamente en sistemas abiertos o cerrados. Los sistemas cerrados son los diseñados para impedir el contacto del agua con el aire y minimizar así las pérdidas de gas disuelto y el atrapamiento de aire. Ambos sistemas tienen ventajas y desventajas.

En un sistema cerrado los gases disueltos se mantienen en solución. Si hay dióxido de carbono y calcio, el pH es estable y se inhibe la precipitación de carbonatos de calcio.

También se evita la oxidación de hierro disuelto y de sulfuros. Sin embargo, el sistema se mantiene a presión y el equipo es más costoso. Además, se permite

que continúe cualquier corrosión resultante de gases corrosivos disueltos, principalmente H_2S y CO_2.

En un sistema abierto no se trata de excluir al aire. En efecto, en muchas plantas el agua es aireada para extraer los gases no deseables tales como el H_2S. Los sistemas abiertos permiten usar grandes estanques de retención que dan tiempo al agua para estabilizarse, las partículas suspendidas se depositan y las gotitas de aceite coalescen en la superficie.

Sin embargo, es posible que la corrosión aumente y se produzcan problemas de incrustración.

3.3.4.1 Remoción del oxígeno. Cuando se debe inyectar el agua, frecuentemente es más económico retirar el oxígeno o usar cañería y tubería recubierta de plástico resistente a la corrosión. Cuando debe descargarse el agua, la presencia de oxígeno disuelto es favorable.

Sin embargo, en algunos casos, particularmente cuando se usan grandes cantidades de agua dulce de reposición, hay que retirar el oxígeno. Existen varios métodos para extracción de oxígeno:

- Separación del Gas: generalmente se realiza con gas natural en una torre de desorción en contracorriente que contiene empaque o bandejas. Las bandejas son más comunes debido a que el empaquetamiento tiende a ensuciarse con los sólidos suspendidos. El principio de la separación es el de reducir la concentración de oxígeno hasta la solución, reduciendo su presión parcial y por lo tanto su solubilidad.

La cantidad de oxígeno extraída es una función de:

- ✓ La concentración de Oxígeno Disuelto en el agua
- ✓ La cantidad de bandejas teórica
- ✓ La relación Gas-Agua

- ✓ La Presión
- ✓ La Temperatura

Una torre de separación bien diseñada puede reducir al oxígeno disuelto a 0.01 a 0.02 ppm.

- La Desaireación en Vacío reduce la presión parcial del oxígeno por encima de la superficie del agua por reducción de la presión encima del agua hasta que el agua hierve.
- La desaireación en vacío también se lleva a cabo en una torre que contiene empaquetamiento o bandejas, aunque el empaquetamiento es menos complejo.
- La presión se reduce en la torre usando una bomba de vacío o una bomba de vacío asistida por un eductor. Las concentraciones de oxígeno se bajan a alrededor de 0.1 ppm en una torre de una etapa y a alrededor de 0.01 ppm en una torre de tres etapas.

3.3.4.2 Remoción del Ácido Sulfhídrico. La clave para la remoción exitosa de H_2S es el control del pH. Con un pH menor de 5, casi todo el H_2S está presente como un gas asociado y puede ser eliminado fácilmente.

Los procesos utilizados incluyen:

- La Aireación satura al agua con aire, causando la liberación del H_2S. Frecuentemente esto resuelve el problema, pero causa muchos más.
- La Separación con Gases de Combustión obtenidos de escapes de combustiones de motores ha sido usada en varios sitios. El CO_2 en el gas ayuda a reducir el pH y ayuda a la separación. Los gases de combustión deben ser controlados cuidadosamente para asegurar la combustión completa y evitar la introducción del oxígeno en el sistema. Una torre de

desorción en contracorriente es usada generalmente con el gas de combustión alimentado por la parte inferior.

3.3.4.3 Remoción del CO_2**.** La ionización del CO_2 también depende del pH y la cantidad que puede ser eliminada es una función del pH. Un pH de 5 produce 95% del gas disponible y un pH de 4 logra 100%. Los métodos de eliminación incluyen:

- La Aireación o barrido mecánico con aire.
- La Desgasificación al Vacío, donde se reduce la presión parcial sobre el agua.

Se debe cuidar de mantener un pH bajo para impedir que se formen incrustaciones. El pH se corrige después de haber eliminado el CO_2.

3.3.5 Remoción de sólidos en suspensión. Los sólidos en suspensión deben removerse de cualquier agua que se va a inyectar, pues es probable que tapen la formación. Se usan varios tipos de filtros para retirar los sólidos.

Las aguas a ser descargadas generalmente se filtran, pues los sólidos no son perjudiciales. Hay varios sistemas de filtro disponibles y los más comunes se tratan a continuación:

3.3.5.1 Filtros de Lecho Graduado Convencionales. Se colocan capas de medio filtrante de diferente tamaño en un recipiente. Las partículas más grandes están en la parte inferior y las más pequeñas en la parte superior. Sólo las partículas más pequeñas actúan como filtro, las demás son capas de apoyo solamente.

Los medios de filtración más comunes son arena, antracita y carbón (grafito).

Los filtros operan generalmente de arriba hacia abajo. Cuando la caída de presión alcanza a 3.5 psia (25 kPa), el filtro se retrolava rápidamente para eliminar los

sólidos que han sido retenidos - usualmente sólo en la primera o segunda pulgada superior de la capa.

Generalmente estos filtros tienen una capacidad nominal de 2.5 U.S.GPM por pie cuadrado de superficie. Las partículas de hasta 25 - 50 mm de diámetro pueden ser eliminadas.

Estos filtros se pueden obstruir fácil y seriamente con aceite. El aceite debe ser eliminado antes de la filtración, y se debe instalar alguna forma de prevención de reboses.

3.3.5.2 Filtros de Alta Velocidad, Lecho Profundo y Flujo Ascendente. Este es básicamente un filtro de lecho graduado convencional donde el flujo es ascendente a través de los lechos graduados y con alta velocidad de circulación. El filtro completo actúa como medio filtrante. Los lechos se sostienen con una estructura de acero en reticulado, y la arena formará arcos de compresión bajo las mallas de acero.

El retrolavado es en el mismo sentido que el flujo. Es precedido por aire para romper los arcos de compresión y fluidizar o expandir el lecho.

Generalmente estos filtros tienen una capacidad fijada de 6 a 8 U.S.GPM por pie cuadrado de superficie. Partículas tan finas como 5 - 10 mm de diámetro pueden eliminarse sin coagulación, y hasta 1 a 2 mm si se introduce una ayuda coagulante tal como el alumbre.

Estos filtros se pueden ensuciar fácil y seriamente con petróleo. Por lo tanto, el petróleo debe separarse antes del filtrado, y deberá instalarse algún medio para evitar el arrastre.

3.3.5.3 Filtros de Alta Velocidad, Lecho Profundo y Flujo Descendente. Estos son iguales que los de flujo ascendente, pero invertidos. Medios filtrantes comunes son

la antracita y el granate, donde la diferencia de la gravedad específica (1.5 vs. 4.2) mantiene al granate en el fondo.

La mayoría de estas unidades operan en el rango de 10-12 U.S.GPM, y se pueden separar partículas de hasta 7-10 mm sin el uso de coagulantes, y hasta 1 a 2 mm con asistencia.

3.3.5.4 Filtros de Tierra Diatomácea (TD). La tierra diatomácea (TD) es esencialmente sílice puro, formado por plantas marinas unicelulares fosilizadas. Se alimenta una suspensión de TD dentro del filtro, y la TD forma una torta filtrante sobre la membrana de sostén o el género de sostén. La operación del filtro continúa hasta que la caída de presión llega a 35 psi o 240 kPa, cuando se comienza el retrolavado. Tanto el medio de filtración (TD) como el material filtrado se descartan.

Debe notarse que:

- Los filtros de TD son los más complicados de todos los filtros usados en campos petroleros en cuanto a operación y mantenimiento.
- Los filtros TD sólo son económicamente viables cuando los sólidos suspendidos son menores que 30 - 50 mg/l.
- Las velocidades de filtración se limitan a unos 2.0 U.S.GPM por pie cuadrado, pero los requerimientos de tamaño total pueden ser algo menores que para los filtros convencionales.
- Los filtros TD retiran el aceite al costo de una vida más corta de operación.
- Se pueden eliminar partículas de hasta 0.5 mm.
- La TD pasa a través del material filtrante y es un agente excelente para obturar formaciones. En sistemas de inyección generalmente se requieren filtros cartucho ubicados corriente abajo.

- La TD puede presentar un problema logístico de suministro. También puede presentar problemas serios la eliminación de TD agotada y sucia.

3.3.5.5 Filtros Cartucho. Hay disponibles filtros cartucho en una gama amplia de materiales y tamaños de poros, en configuración descartable o enjuagable. Los filtros cartucho generalmente se clasifican con un grado nominal (es decir, 10mm al 98% significa que el 98 % de los sólidos con tamaño de partícula de 10mm serán retenidos) y la variación de cualquiera de las condiciones puede cambiar considerablemente el desempeño. Si fuera posible deberían llevarse a cabo pruebas en el lugar para determinar la eficiencia real antes de finalizar la selección.

3.3.5.6 Sedimentación. En proyectos muy grandes, o donde hay presentes sólidos suspendidos muy finos se usan métodos de coagulación y sedimentación. La sedimentación por gravedad en lagunas grandes es efectiva pero no ha sido usada en forma amplia hasta hace poco debido a la carencia de coagulantes apropiados. El desarrollo de polímeros sintéticos (polielectrólitos) ha ampliado mucho la gama de aguas que pueden tratarse y clarificarse.

Los polímeros causan coagulación y floculación hasta que las partículas crecen a un tamaño que se precipitan a una velocidad razonable.

La selección de los coagulantes se hace a menudo, en base a la recomendación de la compañía química, y muchas veces por tanteo.

El agua de las lagunas de sedimentación deberá ser filtrada luego de la sedimentación y antes de su uso, para retirar cualquier sólido restante.

3.3.6 Biocidas.[25] Los biocidas son sustancias activas o preparados que contienen una o más sustancias activas, presentados en la forma en que son suministrados

[25] ACEBIÑO, boletín informativo tomo núm. 18 – 3° Trim. 2011.

al usuario, destinados a destruir, contrarrestar, neutralizar, impedir la acción o ejercer el control de otro tipo sobre cualquier organismo nocivo. Atendiendo a su mecanismo de acción pueden clasificarse en:

- Oxidantes (Reaccionan inactivando proteínas de membrana celular)
- No oxidantes (Varios mecanismos como reacción con enzimas intracelulares)

3.3.6.1 Bacterias. Se deben añadir biocidas al agua que se inyectará si hay bacterias presentes en el agua, ya que varios tipos de bacterias pueden conducir a serios problemas en el yacimiento y en los sistemas de tuberías.

Las bacterias son extremadamente pequeñas (0.5mm en diámetro) y hay miles de especies. Pueden configurarse como bastones, esferas o curvas. Algunas pueden duplicar su población en menos de 20 minutos, abrumando literalmente un fluido.

Las bacterias pueden soportar variaciones amplias de temperatura (-10 a 100°C), de valores de pH (0 a 10.5) y variaciones en las concentraciones de oxígeno (0 a 100%). En el agua se desarrollan mejor con un pH de 5 - 9, temperaturas menores de 80°C y, aunque prefieren el agua dulce, se adaptan bastante a las salmueras.

En el campo petrolero, las bacterias se clasifican en tres categorías:

1) Aeróbicas - requieren oxígeno para vivir.
2) Anaeróbicas - crecen mejor en ausencia del oxígeno.
3) Facultativas - crecen con o sin oxígeno.

3.3.6.2 Bacterias que causan problemas. Las bacterias que causan los problemas más serios son las bacterias reductoras de sulfatos (SRB). Estas reducen los iones de sulfatos y sulfitos presentes en muchas aguas de campos petroleros a iones de sulfuros, y liberan el H_2S como subproducto. Pueden surgir cuatro problemas:

1) Las bacterias pueden participar directamente en la reacción de corrosión, causando picadura severa en la tubería de acero.

2) La generación de H_2S puede aumentar mucho la corrosividad general del agua.

3) Hay también varios casos en que yacimientos enteros dulces se han vuelto sulfurosos agrios, resultando en problemas serios. El mecanismo agriante no es bien entendido, pero las bacterias reductoras de sulfatos son una posibilidad obvia.

4) El H_2S libre puede conducir a la rajadura y ampolladura sulfurosa de los aceros.

5) La corrosión agria resulta en sulfuro ferroso - un polvillo negro que es un agente excelente de obturación de yacimientos.

Se reconocen cuatro familias principales de SRB:

Tabla 5. Bacterias Reductoras De Sulfatos

Género	Especie	Forma
Desulphavibrio	Africans	Bastón sigmoideo
	Desulphuricans	Vibrión
	Salexigens	Vibrión
	Vulgaris	Vibrión
Desulphotomaculum	Nigrificans	Bastón
	Orientis	Bastón curvado

Fuente: Modificado Guía Ambiental de ARPEL No. 1

Las SRB requieren nutrientes para crecer. Entre los nutrientes primarios se hallan el carbono, el nitrógeno y el fósforo (generalmente hallado en alcoholes, ácidos orgánicos, inhibidores de incrustración), el hierro disuelto y los iones de sulfatos o sulfitos.

Otras bacterias que causan problemas serios son las bacterias del hierro y formadoras de lama. Las bacterias del hierro depositan una lámina de hidróxido férrico alrededor suyo a medida que crecen, causando la corrosión y obturación. Cantidades grandes pueden producir hidróxido férrico suficiente para causar obturación severa del yacimiento. Las formadoras de lama generan masas de lama densa sobre superficies sólidas y causan corrosión y obturación similares a las bacterias del hierro.

3.3.6.3 Cultivo e identificación de las bacterias. El monitoreo de un sistema de agua involucra el muestreo, cultivo (crecimiento) de las bacterias para determinar el número presente y para identificar las especies, para que se pueda seleccionar un biocida eficaz. El API RP 38 describe un método para examinar las aguas de inyección, y es usado por muchos laboratorios.

3.3.6.4 Control Químico. Los productos químicos o matan a las bacterias (bactericidas) o retrasan o inhiben su crecimiento (bacteriestatos). También se obtienen productos químicos de alcance más amplio como biocidas que matan toda forma de vida, y los bioestatos que retrasan toda forma de vida.

El biocida inorgánico más común es el cloro agregado al agua. [26] Los bactericidas orgánicos son las aminas, fenoles clorados, aldehidos y los compuestos de amonio cuaternario. Se recomienda la evaluación de los distintos productos químicos por un laboratorio como paso inicial en la selección. En la selección de los productos químicos debe considerarse si matar o controlar - e.g. para reductoras de sulfatos se requiere una matanza total y se recomienda un bactericida, mientras que un control (bioestato) de las lamas muchas veces es suficiente.

[26] ARPEL, Guía Ambiental No. 1, Guía Para La Disposición Y El Tratamiento De Agua Producida, Javier de viana 2345 CP 11200 Montevideo Uruguay. 2001.

Se debe notar que el cloro es sumamente venenoso y debe manejarse con cuidado.

Adicionalmente, muchas bacterias desarrollan una resistencia contra productos químicos particulares con el transcurso del tiempo. El uso de dos bactericidas (en forma alternada) generalmente resuelve este problema, pero es prudente hacer evaluaciones de laboratorio anualmente.

3.3.6.5 Compatibilidad. Asegure que el producto que se use sea compatible con el agua. Algunos pueden causar precipitados que son un problema tan serio como las bacterias. También controle la compatibilidad con otros productos químicos tales como los removedores de oxígeno o inhibidores de incrustación, etc.

3.3.6.6 Aplicación. El tratamiento puede ser continuo por inyección - a una concentración más elevada inicialmente si es que se ha permitido el desarrollo de un problema, y reduciendo luego a medida que desaparece éste - o en tratamiento por baches. En el proceso por bache se bombea periódicamente un bache de alta concentración a través del sistema con el propósito de producir una matanza total. Los bactericidas orgánicos son empleados de esta manera.

Cuando se trata con bactericidas, hágase lo siguiente:

1. Límpiense a fondo las líneas de inyección, tuberías, etc.
2. Limpie a mano todo el lodo, lama, etc. de los tanques, recipientes y filtros.
3. Enjuague por contraflujo todos los pozos de inyección.
4. Elimine zonas de estancamiento o de baja velocidad.
5. Esterilice el sistema - use un bache de alta concentración de bactericida con suficiente tiempo de residencia para asegurarse una matanza completa.

Luego será necesario un monitoreo continuo y estricto para determinar si el tratamiento elegido ha sido exitoso.

4. CONSIDERACIONES TÉCNICAS PARA EL ALMACENAMIENTO DE AGUA

Para el desarrollo de un proyecto de reinyección se debe tener presente la caracterización hidrogeológica de una formación acuífera, además de una fase previa de recopilación y síntesis de la información existente de la zona de estudio, requiere llevar a cabo una combinación, coordinación y vinculación entre las diferentes tareas a realizar en especialidades como: geología, estratigrafía, análisis estructural, hidrogeología, hidroquímica, geofísica y geoquímica; con el fin de que aporten la suficiente información para definir aspectos relativos a la determinación de la estructura geológica, las características físicas, el funcionamiento hidrodinámico, las características hidroquímicas, isotópicas y ambientales y, finalmente, la definición del modelo geológico e hidrogeológico.

4.1 GEOLOGÍA, ESTRATIGRAFÍA Y ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Desde el punto de vista de la cartografía geológica resulta conveniente elaborar un mapa geológico continuo a escala, prestando especial atención a la definición cartográfica de las unidades litoestratigráficas de mayor interés hidrogeológico y la correlación estratigráfica entre las diferentes unidades. Resulta preciso establecer la estratigrafía de la zona, en función de la litoestratigrafía regional, los afloramientos próximos y la revisión de las columnas de los sondeos existentes y definir, en su caso, los cambios laterales de facies. Asimismo, se deberá abordar el análisis secuencial de las formaciones seleccionadas por su interés hidrogeológico, con la finalidad de disponer de un modelo de distribución de facies, y el control estratigráfico de los rasgos físicos (porosidad, permeabilidad) que influyen en el comportamiento hidráulico de las formaciones. Paralelamente al análisis estratigráfico y secuencial se realizará un estudio diagenético de las formaciones acuíferas, que consistirá en la caracterización petrológica de dichas formaciones y de su historia diagenética.

Los trabajos de geología estructural deberán centrarse en dos objetivos: determinar el control de las macro estructuras sobre el comportamiento del flujo regional y caracterizar las formaciones acuíferas desde un punto de vista microestructura, atendiendo a las direcciones preferentes de fracturación que pueden actuar como controladoras de flujos preferenciales, así como definir posibles relaciones entre fracturación y la secuencialidad de las series.

4.2 HIDROGEOLOGÍA

Desde el punto de vista hidrogeológico existen una serie de actividades que se pueden considerar como básicas en cualquier estudio y entre las que cabe citar: la determinación del marco hidrogeológico; la definición de las formaciones acuíferas existentes y la relación entre ellas; la elaboración de una cartografía hidrogeológica regional que permita definir, entre otros objetivos, las áreas de recarga; el inventario de puntos acuíferos, de manera que se asegure la observación de los niveles en el acuífero; el establecimiento de redes de observación piezométrica, de calidad e intrusión, en su caso, definidas a partir del análisis detallado del inventario de puntos acuíferos, y que permitan definir la morfología y evolución de la superficie piezométrica y su relación con la información geológica obtenida. Otra tarea básica es la realización de un estudio hidroclimático que servirá como punto de partida para el establecimiento del balance hídrico del acuífero, permitiendo evaluar las aportaciones hídricas y estimando la recarga. Como técnicas novedosas de apoyo a la determinación del balance hídrico se puede plantear la utilización de imágenes aéreas en infrarrojo térmico (IRT) con objeto de detectar y localizar con precisión las posibles salidas de agua subterránea al mar y el análisis de las anomalías en la concentración de trazadores ambientales presentes en las mismas.

Otra información hidrogeológica complementaria es la obtención de los parámetros hidráulicos de las formaciones permeables mediante le realización de ensayos de bombeo de larga duración y ensayos de interferencia. También puede

resultar de interés caracterizar hidráulicamente las formaciones que actúan como acuitardo y que, por tanto, suponen una cierta protección y/o aislamiento del acuífero profundo con respecto a otros más superficiales.

4.3 HIDROQUIMICA

La determinación de las propiedades químico-físicas del agua de la zona de interés, constituye una herramienta imprescindible para lograr caracterizar un acuífero o zona de almacenamiento. La primera fase de todo trabajo hidrogeoquímico, comprende el estudio bibliográfico y visitas de reconocimiento en el área objeto de estudio. En esta etapa también se toman muestras, las cuales se analizan con fines de orientación.

Para la aplicación de los métodos hidrogeoquímicos en el estudio de la disolución hídrica, es necesario tomar en cuenta el balance hídrico y parámetros geoquímicos que caractericen a cada sistema, relacionando el volumen de infiltración y circulación del agua con la composición química de la misma en el área de descarga del acuífero. Con ese objetivo, en la segunda fase del trabajo se seleccionan los puntos o estaciones de observación sistemática y se instalan los equipos de registro o medición necesarios para el control de las precipitaciones, los caudales y el quimismo de las aguas.

La composición química de las aguas subterráneas está controlada por los equilibrios químicos de los carbonatos y de otros minerales presentes en la roca almacén y varía al cabo del tiempo. Por esta razón, los análisis químicos y las mediciones de pH, así como la conductividad eléctrica deben hacerse “in situ”. En muchos países, lamentablemente se acostumbra a hacer los análisis y mediciones en el laboratorio, muchas veces hasta semanas después de tomada la muestra, cuando se está en la práctica, carecen de valor para interpretar los fenómenos de la naturaleza.

La caracterización hidroquímica de las aguas de un sistema hidrogeológico contribuye de forma decisiva al conocimiento y a la definición del modelo de circulación del flujo subterráneo y aporta información sobre la presencia de fenómenos de mezcla y flujos inducidos, de los procesos de interacción agua-roca y de la influencia de la zona no saturada en las características del agua. Para ello se realizan análisis detallados de su composición en elementos mayoritarios, minoritarios y traza, así como de sus características fisicoquímicas. La aplicación de estas técnicas permite establecer en una primera aproximación su clasificación y diferenciación en grupos homogéneos, útil, entre otras cosas, para su representación cartográfica. Además, el análisis de las relaciones iónicas e índices geoquímicos, tanto en las muestras aisladas como en muestras convenientemente distribuidas espacialmente, hace posible determinar el origen más probable del agua y la evolución que ha seguido en su contacto con los materiales que conforman el acuífero y la posible influencia de la actividad antrópica. Los datos obtenidos aportan también información sobre la existencia de zonificación y estratificación de las aguas en el sistema y su tiempo de residencia. El estudio de algunos iones minoritarios tales como bromo, yodo, litio, boro y estroncio, así como ciertos índices geoquímicos relacionados con ellos, pueden ayudar igualmente a la identificación y diferenciación de procesos de mezcla de aguas salinas.

Con respecto a la caracterización isotópica de las aguas subterráneas de acuíferos profundos (básicamente isotopos estables, tritio y carbono-14) permite investigar el origen y la dinámica de las aguas presentes en los diferentes sistemas acuíferos, aporta información tanto de la estratificación como de la edad de las aguas, su procedencia (zonas, mecanismos y épocas de recarga, etc.) y las posibles relaciones o interconexiones entre ellas. La distribución de los contenidos de tritio permite poner de manifiesto la distribución espacial y profundidad alcanzada por las aguas infiltradas en las últimas décadas. Estos resultados también informan sobre el grado de aislamiento de las aguas profundas respecto a

las situadas en niveles más someros. La datación de estas aguas se completa con la medida de carbono-14 en muestras seleccionadas, lo que indicara la presencia o no de paleo aguas en los niveles carbonatados profundos, y su posible origen. También puede resultar de interés el estudio de los isotopos del boro como indicador para la identificación de fuentes de contaminación.

4.4 GEOFÍSICA

Los métodos geofísicos son una forma de obtener información detallada de las condiciones del suelo y rocas del subsuelo. Los métodos geofísicos como: gravimétrico, magnético, sísmicos y eléctricos; contribuyen de manera significativa a la exploración de las aguas subterráneas y caracterización de las formaciones que las contienen[27]. Los sísmicos y eléctricos son los más utilizados para resolver la mayor parte de los problemas planteados con la mejor relación coste/beneficio.

Existen dos grandes prospecciones físicas entre las cuales están:

- Activos: Introducen una alteración en el terreno y miden su respuesta.
- Pasivos: Miden la variación de alguna propiedad natural del terreno.

En general los métodos activos, si son aplicables, permiten determinaciones más precisas. Las técnicas utilizadas son muy variadas, están en continuo desarrollo y necesitan de especialistas para su aplicación e interpretación. En términos generales, podemos decir que la prospección geofísica en la investigación hidrogeológica tiene varias finalidades las cuales se pueden resumirse en tres grandes apartados:

- Delimitación de zonas favorables para la explotación del agua subterránea o selección de la posible zona almacén: (definición de la geometría de los acuíferos), es un procedimiento indirecto que consiste fundamentalmente

[27] GEOFISICA. Introducción a la geofísica. Pdf

en determinar la topografía del techo y de la base de la formación acuífera, así como de su extensión lateral.

- Control de la calidad de las aguas subterráneas: Consiste en localizar el límite entre aguas de diferente composición química, como consecuencia de la contaminación. El agente contaminante puede ser debido directamente a la acción humana (vertidos industriales, agrícolas, etc.) o inducida por la sobreexplotación (intrusión marina), y se detecta a menudo mediante el aumento de la conductividad eléctrica aparente que provoca el incremento de mineralización del agua subterránea.
- Estimación de los parámetros hidráulicos: Consiste en establecer correlaciones entre los parámetros físicos medidos y las características hidrodinámicas de la formación acuífera. Esta aplicación no puede efectuarse en todos los casos, ya que es necesario disponer en el sector estudiado de un cierto número de sondeos en los que se conozcan las características hidráulicas para tratar de obtener una correlación estadística. Hay que tener en cuenta el papel que puede jugar la geofísica aportando información complementaria para la elaboración de modelos matemáticos de flujo y transporte de masa en la simulación hidrogeológica de los acuíferos.

4.4.1 Geofísica de superficie. A continuación, se describen los métodos geofísicos:

4.4.1.1 Gravimétricos. La gravimetría consiste en la medición del campo de gravedad y sus variaciones debido a la desigual distribución de masas en el interior de la tierra. Las variaciones en la densidad se deben ya sea a la variación en la topografía o en el caso de estar en un terreno con topografía plana, tendremos que cualquier anomalía de gravedad se deberá a desviaciones de la densidad del subsuelo respecto de la “densidad base”. En otras palabras, las

anomalías gravitatorias son originadas por variaciones en la distribución de la densidad másica punto a punto (3D).

Si la topografía es compleja, las anomalías de gravedad podrán estar relacionadas ya sea con la geometría del terreno y/o con la distribución de densidades lo cual da como resultado variaciones en el valor de la gravedad como resultado exclusivo debido a las diferentes densidades de las rocas luego de haber realizado las correcciones ya sea por topografía u otras puede ser conveniente realizar un análisis estadístico de la gravedad y mostrar las desviaciones respecto a la "densidad base". Y así poder determinar a que se deben esas anomalías.

4.4.1.1.1 Aplicación. Por medio de este método se pueden detectar contrastes de densidad existente en la corteza terrestre debido a los distintos tipos de rocas que constituyen la corteza[28]. Los pliegues como anticlinales hacen aumentar localmente la fuerza de la gravedad en sus proximidades, mientras que los domos de sal (con densidades más bajas) la disminuirán. Las rocas sedimentarias son menos densas en comparación de las rocas que conforman el basamento.

Con el método gravimétrico se puede delinear la interface o el límite de las rocas sedimentarias y las rocas del basamento subyacentes o las dimensiones de cuencas sedimentarias formando lechos u otras depresiones en las rocas del basamento. Es un método muy útil para la exploración inicial de áreas cubiertas por una capa uniforme, que esconde los afloramientos y las estructuras del subsuelo.

Combinando los datos gravimétricos con los resultados de la exploración sísmica, se puede identificar claramente las estructuras y formaciones geológicas como domos de sal o de roca ígnea.

---

[28] JAIMES, Jose David. Métodos geofísicos aplicados a la caracterización de suelos: estado del arte. Trabajo de grado (ingeniería civil). Universidad Industrial de Santander. Facultad de físico-mecánicas. Escuela de ingeniería civil. Bucaramanga. 2011.

Entre las características que permiten aplicar la gravimetría a la hidrología se encuentran: determinar la posición y evaluar el salto de falla (conocida la densidad), cartografía de horst, entre otros; definir la morfología y profundidad de cuencas sedimentarias; definir la morfología del sustrato bajo depósitos aluviales; localización de valles fósiles y paleocanales y determinar la potencia del aluvial sobre roca firme.

4.4.1.2 Sísmicos. El registró e interpretación de los sismos naturales motivó a los geofísicos a adaptar la tecnología "pasiva" y convertirla en prospección sísmica, donde el microsismo puede ser generado por una explosión ("tronadura"), golpe de martillo, caída de un objeto muy masivo. Estos procedimientos se basan en las diferentes velocidades de propagación de las ondas vibratorias de tipo sísmico a través de diferentes medios materiales. Las mediciones realizadas permiten establecer que esa velocidad de propagación varía entre 150 y 2.500 m/s en suelos, correspondiendo los valores mayores a mantos de grava muy compactos y las menores a arenas sueltas; los suelos arcillosos tienen valores medios, mayores para las arcillas duras y menores para las suaves. En roca sana los valores fluctúan entre 2.000 y 8.000 m/s. Esencialmente el método consiste en provocar una explosión en un punto determinado del área a explorar usando una pequeña carga de explosivo. Por la zona a explorar se sitúan registradores de ondas (geófonos), separados entre sí de 15 a 30 m. La función de los geófonos es captar la vibración, que se transmite amplificada a un oscilógrafo.

Los métodos sísmicos tienen la ventaja de ser económicos rápidos y confiables permitiendo determinar la geometría y disposición de las rocas del subsuelo.

4.4.1.2.1 Aplicación. La refracción sísmica permite entre otras cosas: determinar la posición y el salto de falla en terrenos sedimentarios, obtener la cartografía de horst anchos, determinar la profundidad del sustrato, determinar la posición y potencia de acuíferos, determinar la profundidad de calizas carstificadas y el

contacto con las calizas compactas y finalmente puede inferirse datos de porosidad.

4.4.1.3 Prospección Eléctrica. Puede ser pasiva o activa; es pasiva cuando se estudian los potenciales eléctricos espontáneos que surgen debido a reacciones químicas naturales que ocurren en el subsuelo, generalmente en las interfaces de rocas distintas; y es activa cuando el potencial eléctrico estudiado surge como respuesta a un estímulo aplicado, inyección de corriente.

Un registro eléctrico de superficie es una serie de determinaciones de resistividad aparente realizadas con el mismo equipo y separación creciente entre los electrodos emisores y receptores de corriente.

La adquisición se realiza con dos electrodos para energizar el suelo y dos electrodos para medir la diferencia de potencial. La correlación entre la corriente inyectada, la diferencia de potencial medida y un coeficiente geométrico relativo a la posición de los 4 electrodos determina el valor de la resistividad aparente del sitio. Los datos obtenidos se representan por medio de una gráfica de una curva bilogaritmica en función de las distancias crecientes entre electrodos. La finalidad de la prospección eléctrica es averiguar la distribución vertical de resistencias bajo el punto sondeado.

Las condiciones propicias para realizar este estudio son:

- Formaciones con sedimentos incoherentes: Se caracterizan porque los tamaños del grano van desde las arcillas hasta las gravas. La permeabilidad aumenta con el tamaño, se buscan materiales permeables con suficiente continuidad lateral y se logra definiendo zonas resistivas gracias a que las arcillas tienen resistividades menores a las arenas y gravas.
- Aluviones: Cuando existe suficiente contraste de resistividad con la formación subyacente, el método permite detectar su espesor.

- Rocas compactas: En este tipo de rocas, las aguas subterráneas sólo pueden encontrarse en grietas o fracturas o en zonas de alteración superficial, es así que la prospección eléctrica ayuda a determinar la profundidad del techo de la roca sana y definir zonas de fracturación.

4.4.1.3.1 Aplicación. Este procedimiento busca estructuras y capas acuíferas y la diferencia entre materiales permeables e impermeables. Así como entre otras aplicaciones están: determinar la potencia de recubrimiento arcilloso, determinar el espesor del acuífero, calcular la profundidad del sustrato, determinar la dirección del flujo.

4.4.1.4 Prospección magnética. Este método detecta anomalías o desviaciones del valor normal del campo geomagnético debido a la presencia de minerales ferromagnéticos, diamagnéticos y/o paramagnéticos. El método magnético es utilizado fundamentalmente desde el aire en entornos cristalinos y metamórficos.

Gran parte del mundo está cubierta con cartografía aeromagnética, hecha para cartografía geológica, prospección minera y de hidrocarburos; sin embargo, esta información puede ser de gran utilidad para la hidrogeología, por su valor de identificación geológica y en especial para la detección de zonas de fallas y diques que pueden no ser visibles en la cartografía geológica de superficie y sí ser de gran importancia como guía para la ejecución de pozos.

4.4.1.4.1 Aplicación. Su utilidad es para determinar la posición cualitativa de fallas y cartografía de horst, calcular la profundidad del basamento en cuencas, permitiendo evaluar la naturaleza litológica del mismo y localización de fallas mineralizadas.

4.4.1.5 Prospección electromagnética. Son especialmente útiles en exploración de acuíferos colgados, cartografía de contaminantes industriales, medición de la salinidad e intrusión marina (al determinar la resistividad de la formación, puede

deducirse la calidad del agua), posicionando la interfase agua dulce/salada. Sus mayores ventajas sobre los métodos de corriente continua es que son más sensibles a pequeñas variaciones de resistividad y que las medidas se pueden hacer más rápidamente y facilitan las investigaciones a mayores profundidades. En general son más efectivos en la detección de conductores que de resistivos. La determinación de anisotropía de las propiedades eléctricas es de utilidad para la localización de alteraciones y zonas fracturadas en terrenos ígneos y metamórficos (medios cristalinos).

4.4.2 Registro de pozos. Aunque los registros de pozos no tienen un enfoque principal en la industria hidrogeológica para la caracterización de acuíferos y más bien tienen un uso principal en la industria petrolera para la caracterización de los reservorios; actualmente se utilizan con mayor frecuencia para caracterizar los acuíferos en proyectos de ARS (almacenamiento y recuperación de acuíferos) y/o AR (recarga artificial).

El registro de pozos consiste en descender al fondo del pozo un conjunto de herramientas que se encuentran suspendidas de un cable (cuyo interior es conductor), este cable mantiene dichas herramientas conectadas a un equipo electrónico de medición en superficie, el cual va a procesar la información registrada en tiempo real, y finalmente permite con ello la caracterización de la formación.

Sin embargo, el concepto de registro de pozo significa cosas diferentes para personas diferentes; para un geólogo esta es primeramente una técnica de mapeo para explorar el subsuelo, para un petrofísico significa poder evaluar la producción potencial de hidrocarburos en un reservorio, para un geofísico es una fuente complementaria de información para el análisis sísmico y para un ingeniero de yacimientos esto es una fuente complementaria que suministra datos para usar en un simulador.

Las propiedades litológicas de las formaciones y sus fluidos son captados por registros geofísicos para medir su resistividad eléctrica y conductividad, su capacidad para transmitir y reflejar la energía sónica, su radioactividad natural, el contenido de hidrógeno, su temperatura y densidad, es por ello que los registros son interpretados en términos de litología, porosidad y contenido de fluido.

Los registros de pozos así mismo permiten efectuar una evaluación desde los siguientes ámbitos, así:

- Evaluación cualitativa[29]. Es la correlación de los niveles estratigráficos de las secuencias sedimentarias, permite la interpretación de la información en la cual se plantea en los mapas y modelos geológicos de los pozos en desarrollo y en los pozos exploratorios.
- Evaluación cuantitativa. Es el cálculo de las características físicas de la formación o acuífero tal como resistividad, porosidad, permeabilidad y saturación de agua; los cuales son base fundamental para determinar las características de una formación y el espesor además de otras.

Los pozos se pueden clasificar según su principio de funcionamiento: resistivo (eléctrico), radioactivos y acústicos, a continuación, se evidencia una descripción de ellos:

4.4.2.1 Registro de Potencial Espontáneo[30]. El potencial espontaneo se presenta por un fenómeno natural que ocurre cuando un nuevo fluido rompe el equilibrio de la formación. Los potenciales son creados por corrientes eléctricas inducidas químicamente, cuando la salinidad del fluido de perforación es diferente a la salinidad del agua de formación. La corriente espontánea se genera debido a que

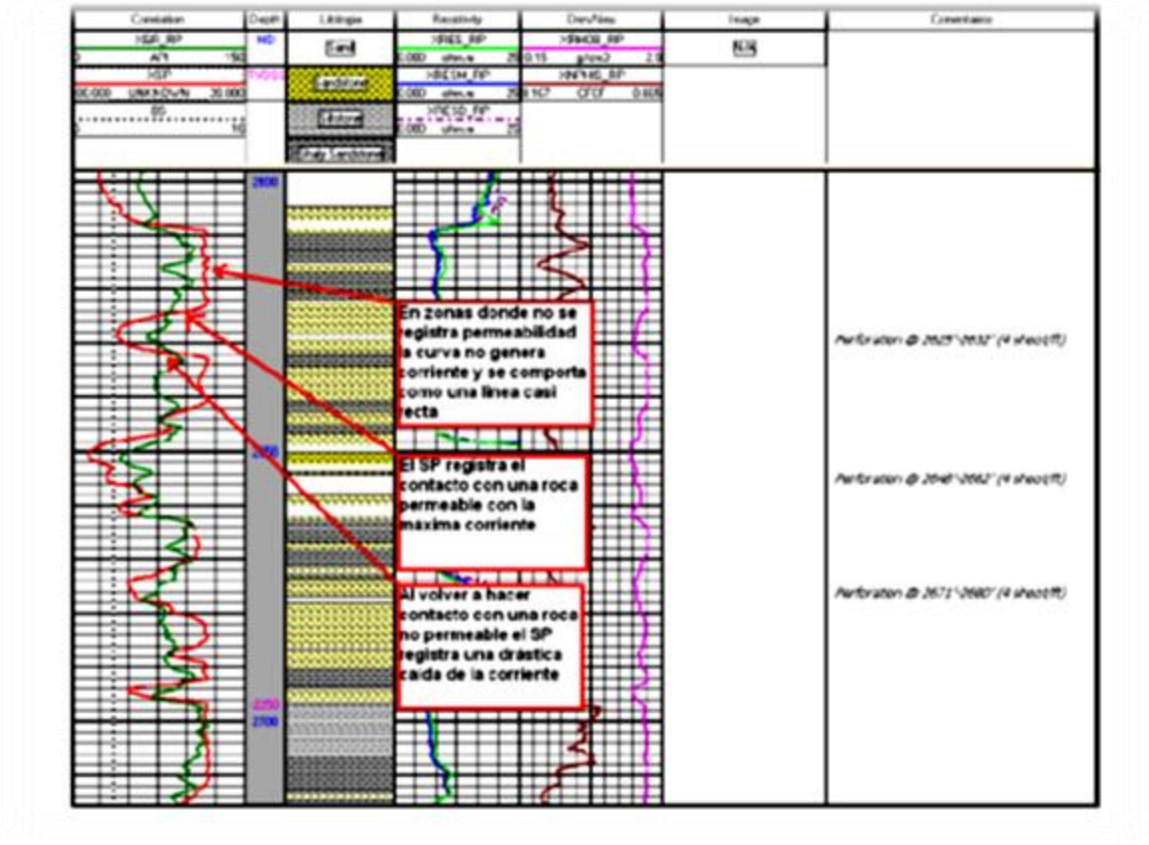
[29] VALDEZ, Edgar. Registro de pozos. 2013.

[30] UNIVERSIDAD MAYOR NACIONAL DE SAN MARCOS. Interpretación de registros de pozos de petróleo.

las formaciones contienen agua las cuales portan componentes salinos, y es el movimiento de los iones de estas sales los que generan una corriente eléctrica.

Las formaciones sedimentarias son generalmente pocas conductoras, sus minerales comunes son silicatos, óxidos y carbonatos, que son prácticamente no conductores. Sin embargo, algunas rocas sedimentarias son porosas y contienen agua en la cual se encuentran varias sales disueltas donde existen cationes y aniones, los cuales tienden a crear un campo eléctrico generando flujos de corriente en los sedimentos.

Figura 19. Comportamiento de la curva SP frente a rocas con alta permeabilidad y no permeables.



Fuente: CIED-PDVSA, Manual de registros de pozos.

La corriente se genera en las interfases capa permeable/capa impermeable y zona virgen/zona invadida. Dentro de la capa impermeable como es el caso de las arcillas no se genera ninguna corriente y el potencial espontaneo (SP) se comporta como una línea recta. En formaciones permeables la curva del potencial espontaneo (SP) muestra deflexiones desde la línea base de arcillas o *nivel de lodolitas*.

En capas gruesas y limpias, la deflexión tiende a alcanzar una desviación esencialmente constante que define un nivel de arenas limpias. En capas gruesas y limpias, la deflexión tiende a alcanzar una desviación esencialmente constante que define un nivel de arenas limpias.

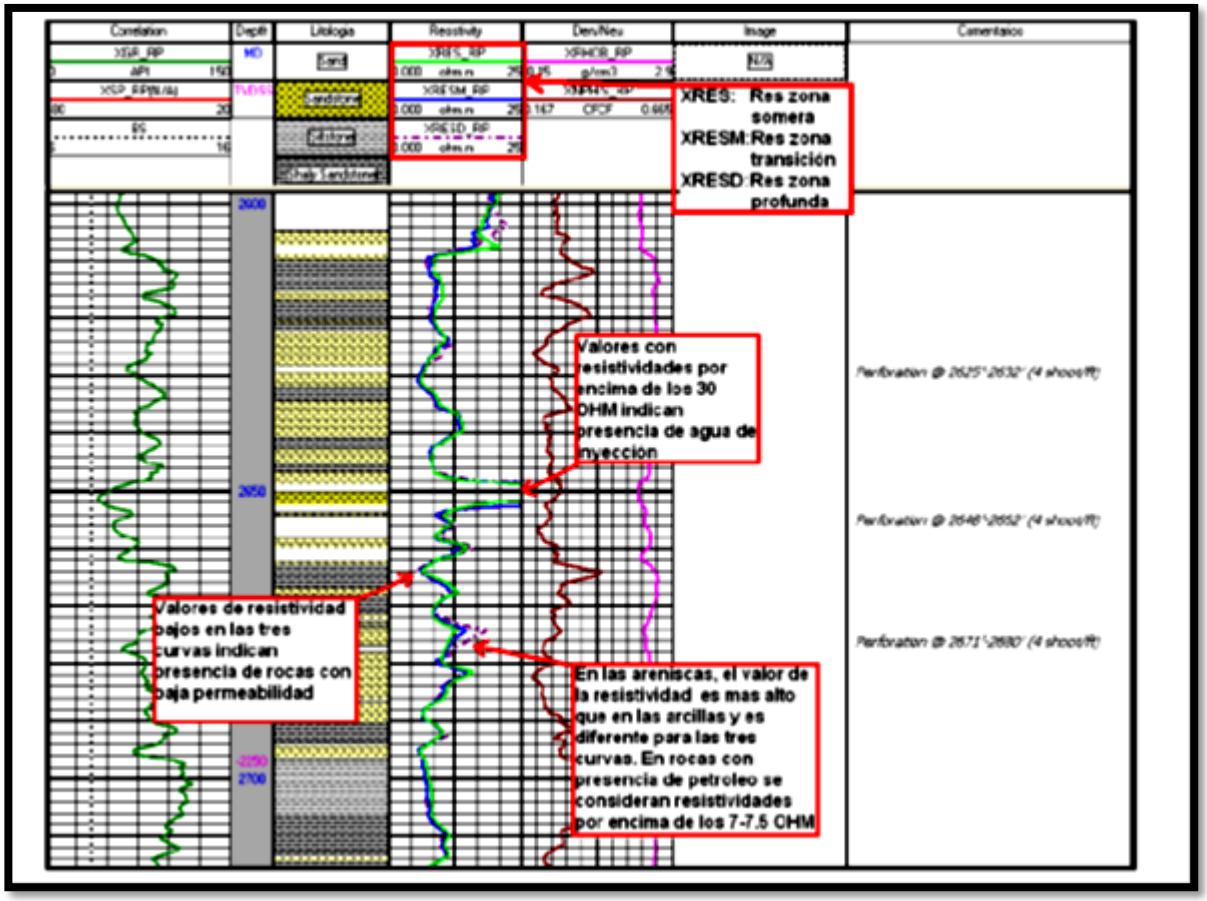
4.4.2.2 Registros de Corriente Inducida. A partir de electrodos, se puede inducir corriente dichos electrodos se ubican tanto en la superficie como en el interior del pozo, y el número de electrodos depende de la herramienta específica que se utiliza. Entre los utilizados están: Microlog (de poca penetración), Laterolog (de mayor penetración) y otros.

Para el caso de las corrientes inducidas, se colocan electrodos tanto en la superficie como dentro del pozo, y se induce un potencial eléctrico entre ellos, generando un campo eléctrico el cual penetrará en la formación, para luego ser detectados en el interior del pozo a través de cada uno de los estratos que componen la formación.

La corriente será conducida con gran facilidad dentro de los estratos que sean más conductivos, y habrá una baja respuesta en los estratos poco conductivos, alta resistividad. Esta variación de intensidad de la corriente es la que permite analizar el tipo de roca que forma cada uno de los estratos. En los campos petroleros la formación está compuesta por rocas sedimentarias, es decir, rocas con alta resistividad, entonces la conducción de la corriente eléctrica va a depender principalmente de los fluidos que se encuentran en las rocas, que son

generalmente rocas porosas como la arenisca. Por ello a partir de estos registros se puede determinar la litología de cada uno de los estratos de la formación.

Figura 20. Comportamiento de las curvas de resistividad ante un tipo de formación y la saturación de fluidos dentro de la roca.



Fuente: CIED-PDVSA, Manual de registros de pozos.

4.4.2.3 Registro Sónico. Dentro de los objetivos de este tipo de registro, se encuentran calcular la porosidad en capas de litología conocida, calibrar datos sísmicos y evaluar porosidades secundarias en combinación con las herramientas densidad y/o neutrón.

En unidades arcillosas donde la velocidad de propagación es menor la curva mostrara altos valores y en unidades arenosas donde la velocidad de propagación es mayor la curva mostrara valores bajos, como se muestra a continuación en la tabla.

Tabla 6. Velocidades sónicas y tiempos de tránsito para diferentes matrices usadas en la fórmula de porosidad sónica.

Matriz	V_{ma} (ft/s)	Delta t_{ma} (µsec/ft)
Arenisca	18,000 – 19,500	55.5 – 51.0
Caliza	21,000 – 23,000	47.6
Dolomita	23,000 – 26,000	43.5
Anhidrita	20,000	50.0
sal	15,000	67.0
Revestimiento (hierro)	17,500	57.0

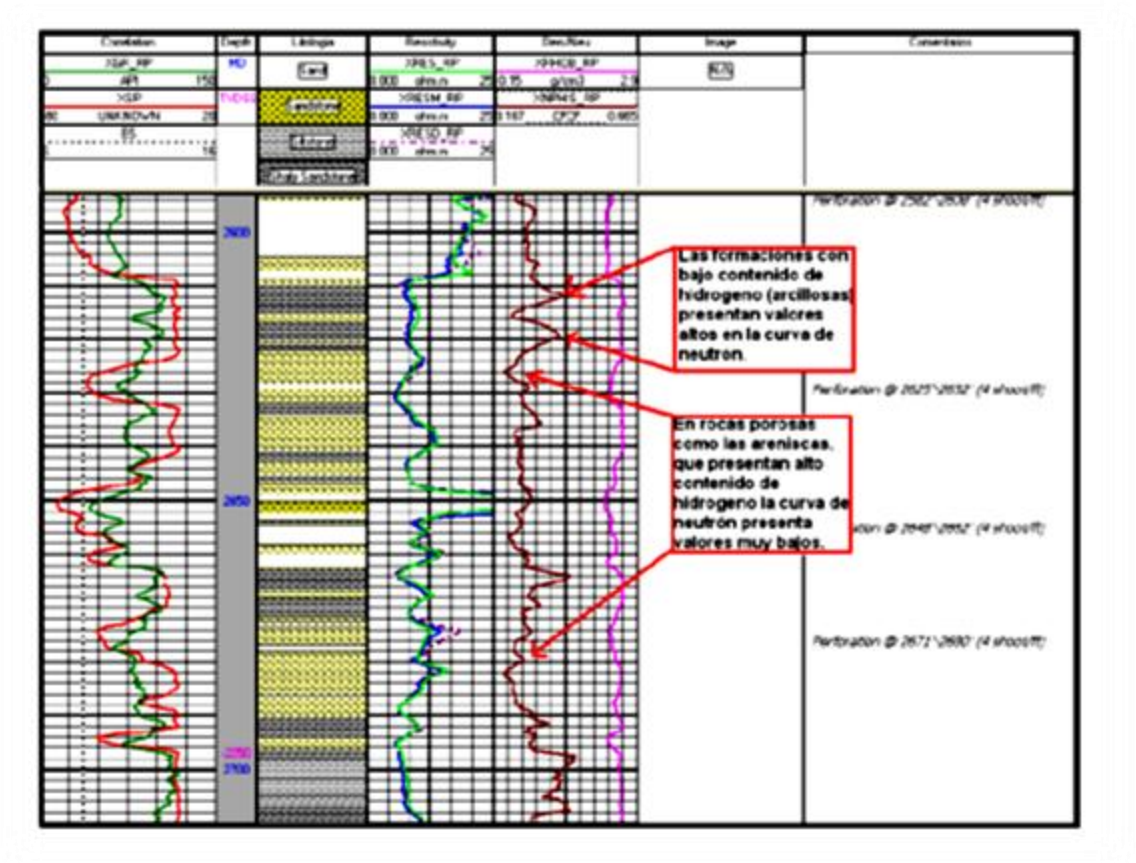
Fuente: CIED-PDVSA, Manual de registros de pozos.

Es importante aclarar que la presencia de porosidad secundaria (fracturas, vugs) tiene el efecto de reducir la cantidad de energía acústica que alcanza el receptor, en otras palabras, el registro sónico responde solamente a la porosidad primaria o de matriz. Como se describirá más adelante, la herramienta densidad mide la porosidad total, es así que una diferencia entre las dos medidas podría indicar la presencia de porosidad secundaria.

4.4.2.4 Registro Neutrón. Este registro permite calcular la porosidad en capas de litología conocida, evaluar litologías de formaciones en combinación con registro *density* y verificar consistencia de las litologías observadas con registros *mudlog*, *gamma ray* y *density*.

El neutrón es una de las partículas elementales del átomo, es eléctricamente neutra y su masa es igual a la del átomo de hidrogeno. Cuando se emplea para registros de pozos, los neutrones son emitidos por una fuente radioactiva a velocidades relativamente altas; al desplazarse de la fuente emisora hacia la formación, chocan con otros núcleos atómicos. Cada colisión produce una pérdida de energía o una disminución de la velocidad hasta llegar a la velocidad termal, donde es absorbido por el núcleo de átomos tales como cloro, silicio, hidrogeno, etc. Esta absorción da origen a la emisión de un rayo gamma de alta energía, el cual se llama rayo gamma de captura.

Figura 21. Comportamiento de la curva neutrón frente a rocas con alta y baja porosidad.



Fuente: CIED-PDVSA, Manual de registros de pozos.

Si el núcleo es pesado, este no provoca mucha pérdida de velocidad. Por lo tanto, la distancia recorrida por los neutrones antes de su termalización es mayor que en el caso anterior y la emisión de rayos gamma de captura tiene lugar a mayor distancia de la fuente. Es así que la presencia del hidrogeno se debe casi enteramente a los fluidos de la formación, por lo tanto, el volumen de los fluidos equivale al volumen poroso.

4.4.2.5 Registro neutrón de doble porosidad. El dispositivo de doble porosidad incorpora además de los dos detectores neutrónicos termales, dos detectores neutrónicos epitermales. Se obtienen así dos mediciones separadas de la porosidad, una por cada par de detectores. En las formaciones limpias, por lo general las porosidades medidas concuerdan. En las formaciones arcillosas que contienen un gran número de absorbentes neutrónicos termales (como el boro y gadolinio), la porosidad medida por los detectores epitermales tiene lecturas más bajas y concuerdan más con la porosidad derivada de la densidad. La combinación de lecturas neutrónicas epitermales y termales de doble porosidad permiten obtener una mejor determinación de la porosidad.

4.4.2.6 Registros Gamma Ray. El registro Gamma Ray (GR), mide de manera continua la radioactividad natural de las formaciones penetradas por un pozo versus la profundidad. Todas las rocas tienen alguna radioactividad; la fuente más común de radioactividad es el K40 y los elementos radioactivos uranio y torio. El material original radioactivo es producido en rocas ígneas, estas son posteriormente distribuidas por procesos de meteorización en formaciones sedimentarias durante la erosión, transporte y depositación. Las aplicaciones principales de este perfil son la correlación, determinación del contenido de arcillas de la formación y el análisis mineralógico.

La curva de rayos gamma se presenta a escala lineal y es usualmente corrido con registros de porosidad (densidad, neutrón y sónico); unas lecturas incrementadas

corren la curva de radioactividad hacia la derecha indicando la presencia de lutitas.

Las radiaciones naturales son emitidas espontáneamente por algunos elementos radioactivos, como el Uranio, Potasio y el Torio que están presentes en las formaciones. Las lutitas son las que contiene la mayor concentración de sales radioactivas y por lo general, son mucho más radioactivas que las arenas, calizas y dolomitas, sin embargo, un alto nivel de radioactividad no siempre es asociado con la presencia de minerales arcillosos. En el caso de las sales potásicas, se presentan anomalías, ya que tienen altos contenidos de potasio, y para el caso de las arenas que contienen uranio o sales con presencia de torio. El uso de la radioactividad natural en la diferenciación de la litología requiere un buen conocimiento de la litología local. Generalmente, como una lutita contiene varios elementos radioactivos, al usar el dispositivo convencional de rayos gamma, quedaba imposible determinar si la radiación gamma se debía a un elemento en particular; por ello en la actualidad existen dispositivos de espectrometría de rayos gamma que pueden fraccionar los porcentajes de Torio, Uranio y Potasio presente en la formación[31].

El perfil GR se mide en unidades API, generalmente, las arenas limpias y los carbonatos tienen niveles de radioactividad que varían entre 15 a 20 unidades API, mientras que en las lutitas la fluctuación es entre 120 y 140 unidades API.

En formaciones fracturadas el perfil GR puede mostrar anomalías, por los altos niveles de radioactividad por la depositación de sales durante la circulación de aguas en las fracturas[32].

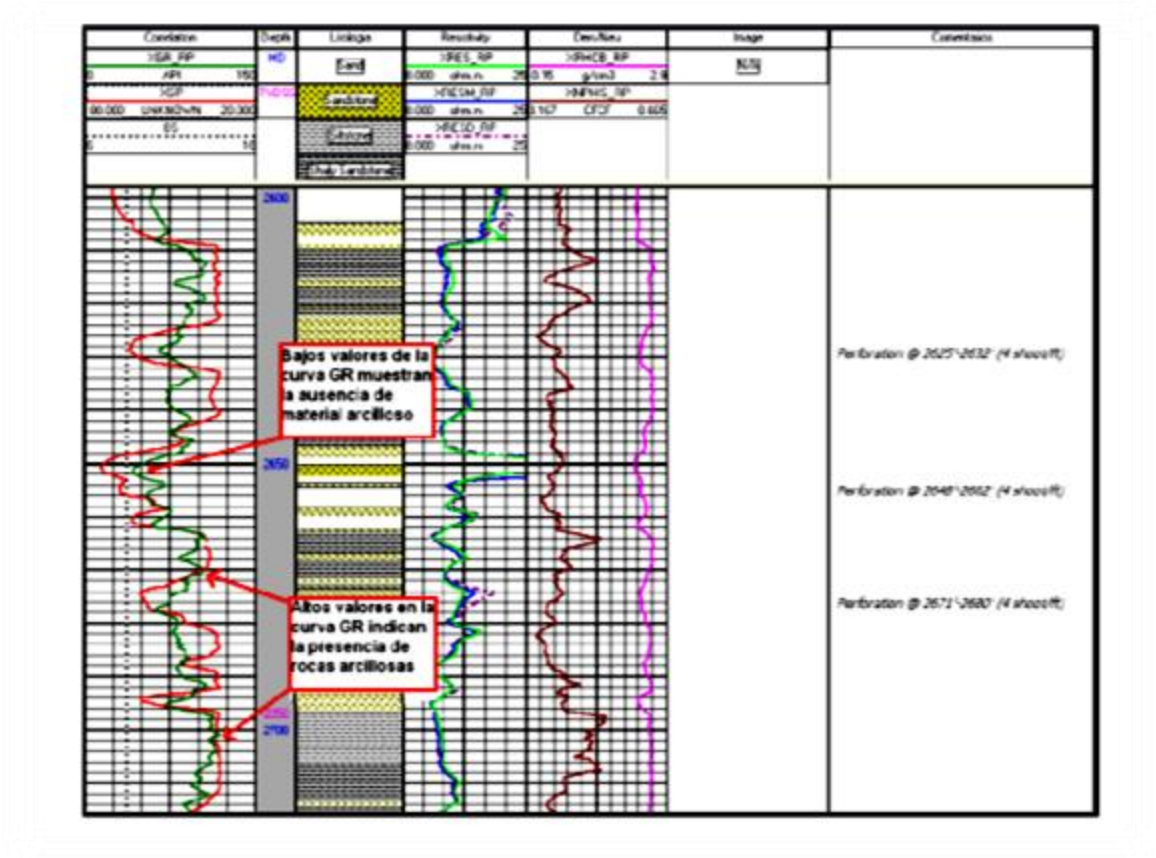
---

[31] BASSIOUNI Z. Theory, measurement, and interpretation of well logs. (1994)

[32] PINEDA J., NUNCIRA S. Análisis de zonas fracturadas mediante el uso de registros eléctricos, para la Formación Mirador, en un campo del Piedemonte Llanero Colombiano. Tesis para optar por el título de Ingeniero de Petróleos. Universidad Industrial de Santander UIS. Facultad de Ingeniera Fisco-Químicas, 2005.

El perfil de rayos gamma espectral muestra la concentración individual de los elementos Uranio (U), Torio (Th) y Potasio (K) presentes en la formación; esto se logra mediante la medición del número de rayos gamma que llegan al detector y el nivel de energía de cada uno de ellas para así poder determinar la concentración de estos tres elementos.

Figura 22. Comportamiento de la curva Gamma Ray frente a rocas con ausencia o contenido de arcilla.



Fuente: CIED-PDVSA, Manual de registros de pozos.

4.4.2.7 Registro de densidad. El equipo de litodensidad es una herramienta que utiliza una fuente radiactiva emisora de rayos gamma de alta energía y se utiliza para obtener la densidad de la formación e inferir con base en esto la porosidad; así como efectuar una identificación de la litología.

Para obtener la densidad, se mide el conteo de rayos gamma que llegan a los detectores después de interactuar con el material. Como el conteo obtenido está en función del número de electrones por cm^3 y éste se relaciona con la densidad real del material, se hace posible la determinación de la densidad.

Ésta técnica es utilizada principalmente para determinar la porosidad de la formación. La medición de la densidad de la formación, también se aplica en la identificación de minerales, detección de gas, evaluación de arenas arcillosas y litologías complejas.

Tabla 7. Densidades de matrix de litologías comunes usadas en la fórmula densidad

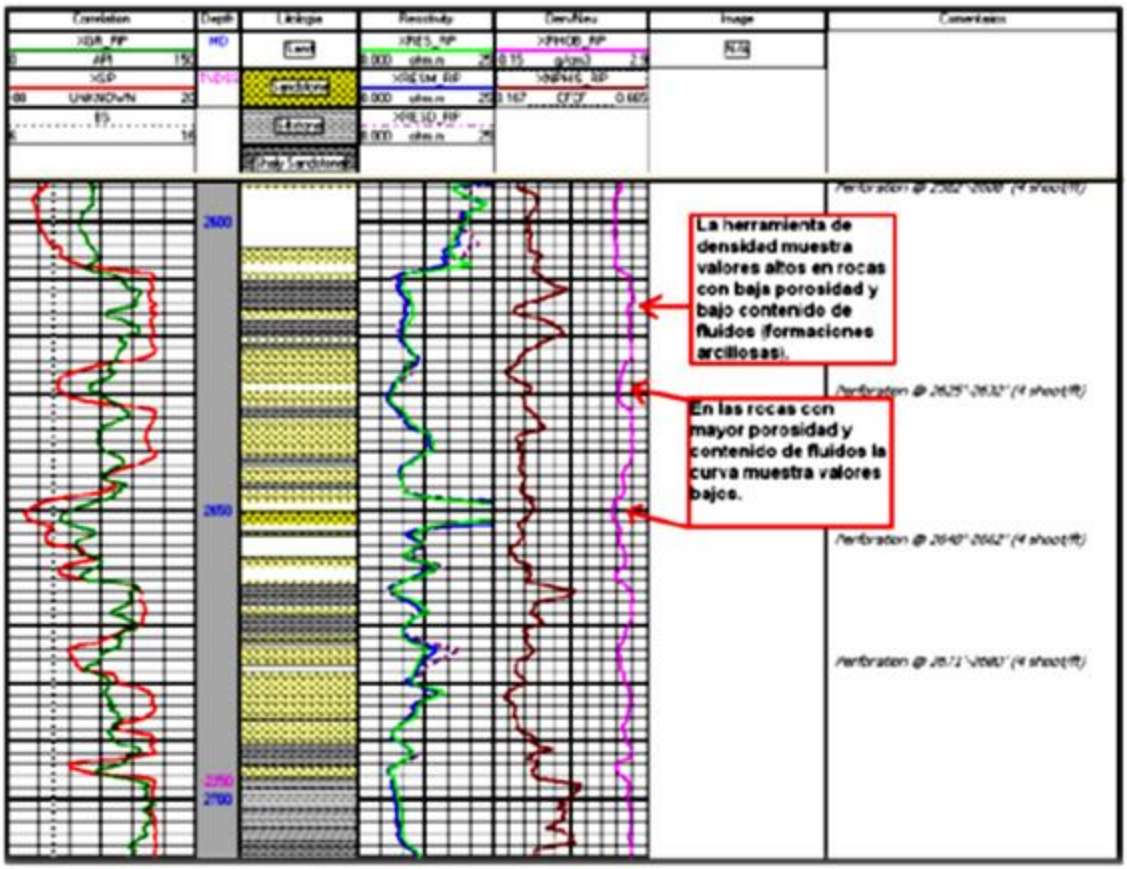
Matriz	pma (g/cc)
Arenisca	2,648
Caliza	2,710
Dolomita	2,876
Anhydrita	2,977
Sal	2,0

Fuente: Registro de densidad. Pdf

- Efectos de las arcillas. La interpretación puede verse afectada por la presencia de lutitas o arcillolitas en la formación. A pesar de que las propiedades de la lutita varían según la formación y el lugar, las densidades típicas de las capas de lutitas en intercalaciones laminares de lutita, fluctúan entre 2.2 g/cc y algo mayor que 2.65 g/cc. Las densidades de las lutitas tienden a ser menores en profundidades superficiales donde las fuerzas de compactación no son tan grandes. El efecto de las arcillas en las arenas depende de su densidad, por lo general su efecto es la disminución de la densidad aparente registrada.

- El perfil de litodensidad. Este proporciona una curva de absorción fotoeléctrica (Pe). Refleja así, el número atómico promedio de la formación, y por lo tanto es un buen indicador del tipo de matriz de roca, siendo así conveniente para la interpretación litológica.

Figura 23. Comportamiento de la curva de densidad frente a rocas con alta-baja porosidad y contenido de fluidos.



Fuente: CIED-PDVSA, Manual de registros de pozos.

4.5 MINERALOGÍA

Generalmente existen tres formas de analizar un mineral o una roca:

- Métodos macroscópicos

- Métodos geoquímicos

4.5.1 Métodos Macroscópicos. Solo con los ojos y algunas herramientas se describe una roca. Las herramientas son: lupa, martillo, ácido clorhídrico, un trozo de vidrio. Se describe: textura, fábrica, color, densidad, dureza, brillo, morfología, exfoliación (fracturamiento), tipos de minerales, etc. [33]

Tabla 8. Descripción de rocas:

1. GENERALIDADES		
Propiedad	**Descripción**	**Tipos**
1.1. Color	Color general	Café, amarillo, bicolor blanco-negro...
1.2. Peso	El peso específico general	Liviano, normal, pesado
1.3. Fracturamiento	Manera como se rompe la roca	Irregular, regular, laminar, cúbico, superficie lisa, áspera
1.4. Dureza	Dureza general	Blando, normal, duro
2. TEXTURA		
Propiedad	**Descripción**	**Tipos**
2.1. Cristalinidad:	Tamaño, visibilidad de los cristales (componentes)	Macrocristalino / fanerítico Microcristalino / afaneritico criptocristalino, amorfo Hialino
2.1.1. Tamaño absoluto de los granos	Tamaño en mm	Grano muy grande, Grano grande, Grano mediano, Grano fino, Compacto
2.2. Distribución de los tamaños	Todos iguales o existen diferentes diámetros	Equigranular, Heterogranular (textura porfídica), Irregular
2.3. Forma de los cristales / de los	Magnitud de la forma "original" cristalina de los	Idiomorfo, Hipidiomorfo, Xenomorfo

[33] Materiales, Métodos, reconocimiento de minerales. Pdf

granos	componentes	
2.4. Magnitud de la cristalización	Cristal o vidrio	Holocristalino, Hemicristalino, Amorfo – hialino
3. ESTRUCTURA		
Propiedad	**Descripción**	**Tipos**
3.1. Orientación de los componentes	Con / sin orientación preferida	Isotropo (sin orientación) Anisotropo: estratiforme, fluidal, esquistosa, plegada
3.2. Ocupación del espacio	Porosidad	Compacto Poroso: pumítica, espumosa, esferulítica
3.3. Límites de los componentes	Análisis del conjunto	Normal, regular Alterado Soldados
3.4. Tipos de granos	cristales o fragmentos	Cristales Fragmentos: minerales, rocas: textura clastica
1.5 Minerales	componentes: contenido modal	Componente principal Componente secundaria Minerales especiales

Fuente: Métodos del reconocimiento de minerales.

4.5.2 Análisis Geoquímicos. Existen varios tipos de análisis geoquímicos. Los más importantes son la fluorescencia de rayos X y la difracción de rayos X. En ambos casos se usan equipos especiales y una preparación de la muestra es necesaria.

4.5.2.1 La fluorescencia de rayos X.[34] Permite un análisis por elementos químicos. Como resultado sale un listado de los elementos químicos principales (SiO_2, Al_2O_3, FeO, MgO), los elementos de traza (Ba, Sr, U, Cu) y las tierras raras

[34] MEXICO DISTRITO FEDERAL, UNIVERSIDAD AUTONOMA DE MEXICO, Doctos, Fundamentos FRX. Pdf

(Y, Nb). Los elementos químicos principales salen en porcentaje %, los otros en ppm (partes por millones).

El fundamento de la Fluorescencia de rayos-X radica en la existencia de un sistema atómico con distintos niveles de energía y las posibles transiciones electrónicas entre ellos. La base de la técnica analítica de la Fluorescencia de rayos-X por dispersión en longitud de onda (WDFRX) es la medida de la energía de la radiación emitida en estas transiciones energéticas y es conocida como fluorescencia de rayos-X. El fenómeno de fluorescencia de rayos-X se puede describir en dos etapas:

- Excitación. Si se considera un sistema en su estado fundamental, es decir de menor energía, al aplicarse una energía de una magnitud suficiente, ésta puede ser absorbida por el sistema, pasando éste a un estado de mayor energía o estado excitado debido a la salida de electrones del átomo. A la excitación producida por rayos X que provienen del tubo de rayos-X, se le llama radiación primaria o fotones de rayos-X primarios.
- Emisión. Los estados excitados son inestables, y el átomo tiende a volver a su estado fundamental, para lo cual se producen saltos de electrones desde los niveles más externos hacia los niveles más internos, para ocupar los huecos producidos. Este proceso produce desprendimiento de energía en forma de radiación de rayos-X secundaria llamada fluorescencia de rayos-X.

4.5.2.2 La difracción de rayos X. Un método de análisis estructural, que permite identificar los minerales por su estructura cristalina, no se trata pues de un método analítico químico, pero, como veremos, permite indirectamente estimar la composición de la muestra analizada con una buena aproximación del contenido en elementos mayoritarios. Se utiliza ampliamente en la mineralogía moderna. Las

posibilidades de estudio de la cristaloquímica estructural y de la composición elemental.[35]

Entre las diversas técnicas de investigación en el campo de la caracterización mineralógica, la técnica de Difracción de Rayos X (DRX) ocupa un lugar muy importante debido al tipo de información que proporciona en las investigaciones geológicas. En el sentido teórico, la difracción es un fenómeno de dispersión de rayos X en el cual participan todos los átomos que constituyen el material irradiado. Debido al ordenamiento periódico de los átomos en una estructura cristalina, los rayos dispersados en distintos átomos llevan entre si un cierto desfase, interfiriendo en su trayectoria posterior, solo algunos de estos presentarán interferencia constructiva. Tal como se muestra en la ***figura 24***, las condiciones para la interferencia constructiva, entre ondas diferentes se cumple solo cuando:

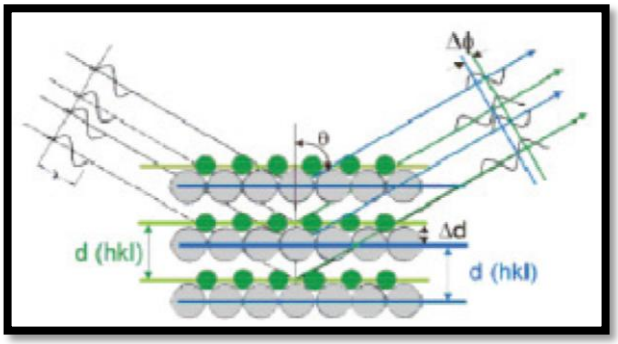
$$n\lambda = 2\ d\ \text{sen}\theta.$$

Dónde:

- λ es la longitud de onda del haz incidente de rayos X
- d es la distancia interplanar.
- θ es el ángulo de incidencia medido entre los planos en consideración y el haz incidente.

[35] TUESTA, Erika Gabriel y HUAYPAR VÁSQUEZ, Yezeña. Aplicación de la técnica de difracción de rayos x (drx) en la industria minera, Laboratorio de Caracterización Mineralógica Buenaventura Ingenieros - BISA. 2012.

Figura 24. Esquema del modelo de Bragg.



Fuente: Aplicación de la técnica de difracción de rayos x (drx) en la industria minera. Pdf

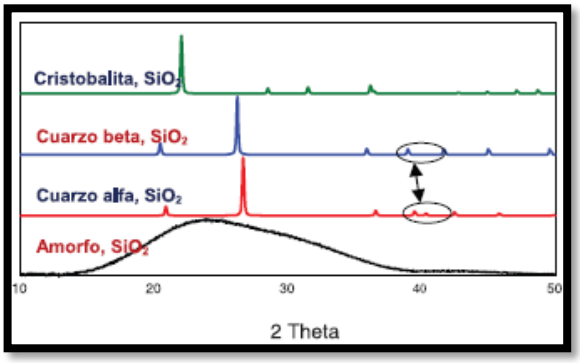
Esta fórmula corresponde a la llamada Ley de Bragg y es la ecuación fundamental de DRX.

En DRX, la λ de los rayos X es fija, y cada plano de átomos produce un pico de difracción en un ángulo θ específico. En un difractograma cada pico de difracción es producido por una familia de planos atómicos, la posición de cada pico indica la distancia interplanar dhkl entre los planos atómicos del cristalito. La intensidad del pico de difracción está asociado a los átomos que están presentes y la ubicación de éstos en los planos atómicos.

4.5.2.1.1 Aplicaciones en DRX. A continuación, se mencionarán las aplicaciones más importantes en DRX, como la identificación de una especie mineral y su diferenciación entre polimorfos, además de la presencia de amorfos.

En la figura 25 se muestra el caso del óxido de silicio (cuarzo) en sus tres fases cristalinas y fase amorfa. En este ejemplo, cada fase está caracterizada por diferentes posiciones angulares e intensidades relativas, de manera tal que si estos estuvieran en una misma muestra se podrían diferenciar.

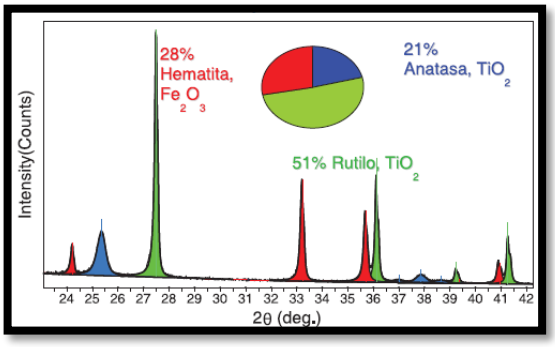
Figura 25. Difractogramas de cuatro direrentes fases que corresponden al SiO_2.



Fuente: Aplicación de la técnica de difracción de rayos x (drx) en la industria minera. Pdf

La cuantificación de fases cristalinas y amorfas, etapa que precede a la identificación, para lo cual se pueden aplicar diferentes métodos como el Refinamiento Rietveld. Este método consiste en un ajuste teórico del patrón de difracción aplicando un modelo que incluye factores estructurales y experimentales. En las **figuras 26 y 27** muestran la cuantificación de fases cristalinas y amorfas.[36]

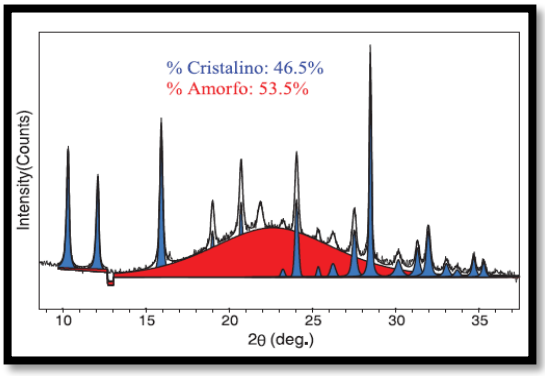
Figura 26. Difractograma de Rayos X que muestra tres fases minerales con sus respectivas cuantificaciones.



Fuente: Aplicación de la técnica de difracción de rayos x (drx) en la industria minera. Pdf

[36] TUESTA, Óp. Cit.

Figura 27. Difractograma de Rayos X que distingue una fase cristalina y otra amorfa con los respectivos cálculos de sus concentraciones.



Fuente: Aplicación de la técnica de difracción de rayos x (drx) en la industria minera. Pdf

5. INYECCIÓN Y MONITOREO DE LAS AGUAS RESIDUALES DEL PETRÓLEO

Luego del tratamiento y la caracterización de la zona donde se llevará a cabo el proyecto, se procederá a la inyección y almacenamiento de las aguas residuales del petróleo, donde se tendrá en consideración las características físico-químico de las aguas tratadas y su compatibilidad con las aguas de formación. Antes, durante y después de la inyección, se debe realizar un constante monitoreo para que tanto como el agua de producción, las facilidades de superficie y las facilidades de subsuelo cumplan con los requerimientos necesarios para llevar a cabo este tipo de proyectos; a continuación, se procederá a describir cada una de los puntos a considerar y/o monitorear.

5.1 COMPACTIBILIDAD DEL AGUA CON LA FORMACIÓN[37]

Una vez ha sido tratada el agua residual del petróleo, se han de realizar análisis para observar que ésta cumple con las condiciones ambientales, así mismo un análisis para determinar que no tenga efecto negativo en la zona en la que se piensa inyectar, entre las pruebas se encuentra.

5.1.1 Análisis iónico y mineral. Se debe medir la concentración de materiales que puedan afectar el avance del proceso por posibles reacciones en la formación o generación de corrosión.

5.1.2 Pruebas de compatibilidad. Un factor de garantía del proceso de inyección de agua es comprobar la compatibilidad del agua de formación con el agua que se va a inyectar; si son incompatibles se pueden presentar reacciones entre las dos aguas y con esto daño a la formación.

[37] ARNOLD, Richard. Manejo de la producción de agua: De residuo a recurso. Schlumberger.

5.1.3 Pruebas de sensibilidad de la formación. El agua inyectada puede generar daños en la cara del pozo si las características químicas del agua son sensibles a la formación, ya que se presentan reacciones químicas entre ellas; las pruebas de sensibilidad se encargan de determinar el efecto causado por los elementos contenidos en el agua inyectada y los presentes en la formación.

5.2 PARÁMETROS OPERACIONALES[38]

Otro factor importante a la hora de llevar acabo la inyección de agua es determinar parámetros operacionales, como lo son tasa de inyección y presión de inyección, dependiendo de las características específicas de la formación almacén. Así mismo, prestar especial cuidado en factores como geología de la formación y propiedades de la roca.

El proceso de inyección de aguas con fines de almacenamiento tiene gran similitud con la inyección de agua en procesos de recobro mejorado en la industria petrolera, es así que es necesario indagar si es favorable la inyección de agua con patrones de inyección o que beneficios se encuentra el determinar el espaciamiento que se deja entre pozos inyectores.

5.2.1 Tasa de inyección. Necesaria para saber cuántos pozos son necesarios para llevar a cabo la inyección, depende de la producción de agua que se tiene en el campo en el que se lleva a cabo el proyecto. Así mismo es la que determina el tamaño de los equipos necesarios para llevar a cabo el tratamiento e inyección del agua de producción.

5.2.2 Presión de inyección. Puede mantenerse a voluntad, pero no debe exceder el límite de seguridad sobre el cual ocurre un fracturamiento en la formación, sí esto llegara a suceder, se ocasionará pérdidas de fluido inyectado,

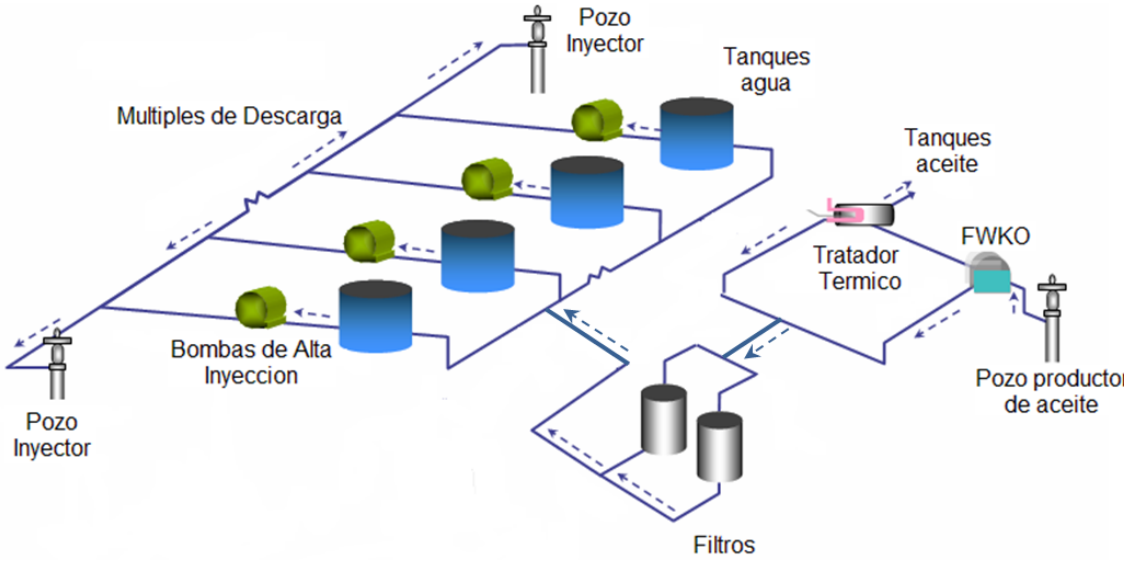
[38] BENNION, D.B.; BENNION, D.W. y BIETZ, R. F. Injection Water Quality– A Key Factor to Successful Waterflooding. JCPT. 1998.

canalización y daño a la formación. La presión de inyección en la cara de la formación, puede ser determinada conociendo la presión del cabezal, la profundidad de la arena y la densidad relativa del agua.

5.3 FACILIDADES DE SUPERFICIE.

Las operaciones y facilidades de superficie varían considerablemente de un proyecto a otro y sufren cambios durante las etapas del desarrollo de la inyección de agua; los patrones de inyección, la topografía de la superficie, las características de la formación, los tipos de pozos (verticales, horizontales o desviados) y las operaciones de campo, entre otros, son el comienzo del diseño y posterior construcción del sistema de facilidades de superficie de un campo.

Figura 28. Sistema de Inyección de Agua Generalizado.



Fuente: Modificado de Water Problems in Oil Production. L. C. Case. PennWel. 1970.

En la ***figura 28*** se observa un sistema de inyección de agua generalizado con una configuración múltiple y se presentan los siguientes equipos:

- Separador bifásico y trifásico (Free Water Knock Out - FWKO).
- Tratador térmico y electroestático (Gun Barrel).

- Filtros.
- Múltiple de descarga (Manifold).
- Tanques de almacenamiento de agua.
- Bombas Booster (Alta capacidad para inyección).

El sistema de facilidades de superficie es un conjunto de equipos que recoge, distribuye, trata y almacena los fluidos producidos e inyectados; en el caso de la inyección de agua, el corazón del sistema de inyección es la estación de bombeo, la cual es responsable de la tasa de inyección, presión de inyección (en fondo y en cabeza de pozo), presión de descarga en la bomba, capacidad de inyección, entre otros factores.

Cada equipo y línea de flujo es importante para el sistema, del correcto funcionamiento de cada uno de ellos, depende el éxito del proyecto, algunos de los equipos más importantes son los siguientes:

- Motores.
- Bombas de inyección.
- Filtros.
- Torre desaireadora.
- Sistema de tratamiento inyección – descarga.

Estos equipos son los más vulnerables a sufrir daños y también los más cruciales en el avance de la inyección.

5.3.1 Motores. Existen motores impulsados por gas natural, máquinas de combustión interna, motores eléctricos (de corriente alterna o continua), impulsados por diesel o gasolina y turbinas de gas natural. La selección del equipo adecuado depende de factores como:

- Compatibilidad con el equipo existente.
- Experiencia del personal en su manejo y mantenimiento.
- Disponibilidad de fuentes de energía durante la vida del proyecto.
- Capacidad de los equipos.
- Consumo de energía.
- Costo actual y futuro de la energía.
- Inversión inicial dependiendo de los tipos de equipos.
- Condiciones de temperatura y altitud.
- Compatibilidad entre las unidades del sistema de inyección.

Lo más importante es considerar cómo la potencia y las curvas de desempeño se ajustan cuidadosamente a los requerimientos de la bomba, permitiendo realizar cambios a las condiciones de operación. Es indispensable regular y controlar periódicamente los dispositivos que suministran la energía, prever posibles descensos e incrementos en la potencia que se está entregando para el funcionamiento de las bombas, para evitar que las tasas de entrega (en el caso de las bombas de inyección) varíen drásticamente y puedan llevar a afectar desfavorablemente el proceso.

5.3.2 Bombas de Inyección. Una bomba es un dispositivo para incrementar la presión de un fluido, la presión diferencial entre la descarga de la bomba y un punto corriente abajo (*downstream*) causa que el fluido se mueva en la dirección de menor presión. Generalmente las bombas utilizadas en los procesos de inyección de agua son de dos tipos: Reciprocantes y Centrífugas.

5.3.2.1 Bombas Reciprocantes. Las bombas reciprocantes incrementan la presión al atrapar un volumen de fluido a una presión de succión, posteriormente

comprimiéndolo para darle un incremento en la presión de descarga, aquí no hay flujo hasta que las válvulas de descarga se abren.

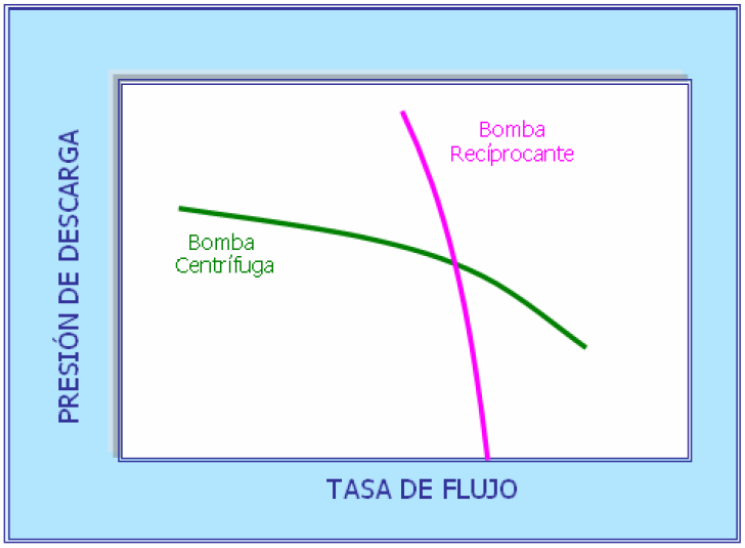
5.3.2.2 Bombas Centrífugas. Las bombas centrífugas incrementan la presión del fluido al aumentar su velocidad dentro de la bomba y luego convierten la energía cinética en un aumento en la presión de descarga de la bomba.

La figura 29 muestra las diferencias fundamentales entre estos dos tipos de bombas: Las bombas reciprocantes tienen una capacidad (volumen de fluido bombeado por unidad de tiempo) que es función de la velocidad de operación, para un bache de fluido dado, la tasa no cambia significativamente sobre un amplio rango de presiones de descarga; una bomba centrífuga tiene una capacidad que es una función directa del incremento de presión a través de ella, en el caso extremo, la presión puede llegar a ser suficientemente alta como para cesar el flujo.

En el momento de la selección de la bomba, es importante analizar los siguientes factores:

- Motor disponible.
- Tasas y presiones de inyección requeridas durante la vida del proceso.
- Expansión futura de la capacidad.
- Calidad del agua de inyección.
- Espacio disponible para la bomba.
- Eficiencia de la bomba.
- Costo inicial, incluyendo instalación.
- Costos de operación y mantenimiento.
- Impacto de la devaluación del equipo.

Figura 29. Curva Típica de Presión vs. Tasa para una Bomba Reciprocante y una Centrífuga



Fuente: The Design Engineering Aspects of Waterflooding. Stephen C. Rose. SPE. 1989.

La tabla 9 muestra una comparación entre los dos tipos de bombas, se señalan las ventajas y desventajas que tiene cada una de ellas sobre la otra.

Tabla 9. Comparación de las Bombas Usadas en Procesos de Inyección de Agua

BOMBAS RECIPROCANTES		**BOMBAS CENTRÍFUGAS**	
Ventajas	**Desventajas**	**Ventajas**	**Desventajas**
Alta eficiencia volumétrica y mecánica.	Alta inversión inicial, debido a su tamaño y peso.	Flujo relativamente calmado con pocas pulsaciones	Baja eficiencia volumétrica y mecánica.
Bajos costos de combustible.	Alto costo de mantenimiento.	Bomba simple mecánicamente y de fácil mantenimiento.	

Incremento en la demanda de potencia como función directa de la velocidad.	Bomba operada a baches (Aceleración en el flujo y desaceleración en el modelo sinusoidal).	Bajos costos de instalación y mantenimiento.	No son diseñadas para ser efectivas a bajas tasas y altas presiones de descarga.
Gran tolerancia a calidades de agua adversas.		La unidad de rotación puede acoplarse directamente al motor, especialmente cuando este es mecánico.	
La tasa no es afectada por la presión sobre un amplio rango.	Genera pulsaciones dañinas requiriendo costos adicionales.		

Fuente: The Design Engineering Aspects of Waterflooding. Stephen C. Rose. SPE. 1989.

Debido a las tasas y a los volúmenes de fluido manejados por las bombas, es necesario llevar a cabo un control sobre cada uno de los elementos que las componen, con el fin de garantizar su adecuado funcionamiento y preservar su vida útil, además de preverse condiciones adversas que puedan llevar a hacer ineficiente el proceso. Para garantizar un buen comportamiento del proceso, es posible encontrar algunas prácticas operacionales frecuentes en cuanto al manejo de las bombas, dentro de ellas se tienen:

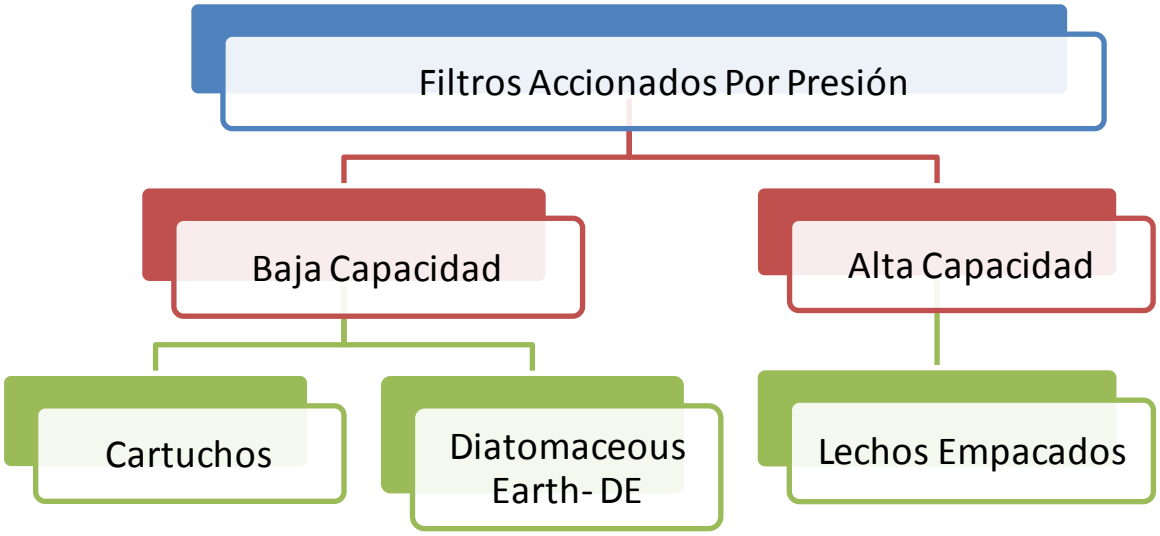
- Control de la velocidad de entrada del fluido para evitar pulsaciones o movimientos fuertes que puedan afectar las partes móviles de la bomba.
- Correcto suministro de la energía que alimenta el sistema.
- Control de la calidad de los fluidos que maneja la bomba.
- Mantener una alineación y amplio espaciamiento que garantice un buen desempeño individual, en los casos donde exista un sistema de bombas trabajando en serie y / o en paralelo.
- Rutinas de mantenimiento y limpieza del equipo que permitan prolongar su vida útil.

5.3.3 Filtros.[39] La filtración es el proceso por medio del cual se pasa un líquido que contiene sólidos suspendidos a través de un medio que permita removerlos. En la industria se encuentran dos tipos básicos de filtros, accionados por gravedad y activados por presión.

En el capítulo 3 en la sección de tratamiento *(Remoción de sólidos en suspensión)* se describen la clase de filtros utilizados en el tratamiento de las aguas de producción para su posterior inyección en este tipo de proyectos.

Según el contenido de sólidos suspendidos en el agua a tratar, los filtros a presión se pueden dividir en dos tipos: baja capacidad (utilizados en aguas con poco contenido de sólidos) y alta capacidad (utilizados en agua con un alto contenido de sólidos), como se puede ver en la ***figura 30***.

Figura 30. Tipos de Filtros Accionados por Presión.



Fuente: Modificado de Integrated Waterflood Asset Management. Ganesh Thakur y Abdus Satter.

[39] KIRK, Joseph W. A Review of Waterflood Filtration. SPE 850. 1964.

5.3.4 Torre Desaireadora. Las fuentes superficiales de agua normalmente están saturadas con oxígeno y otras fuentes pueden tomarlo en solución durante el proceso, es por esto que es necesario incluir dentro del tratamiento del agua, un método que permita eliminar el oxígeno, con el fin de evitar problemas de corrosión en los equipos. Se pueden usar reacciones químicas con sulfuro de sodio o dióxido de sulfuro, desaireación al vacío y despojo con gas natural o gas inerte.

En los procesos de inyección de agua, lo más común es usar la torre de vacío, esta puede estar formada de una o más etapas dependiendo del contenido de oxígeno disuelto en el agua a tratar. Debido a que la solubilidad del gas en un líquido es directamente proporcional a la presión del sistema, al reducir la presión se reduce la cantidad de gas disuelto, el empaquetamiento en la torre y una tasa de flujo correcta permiten una amplia área superficial del agua, permitiendo que ésta alcance un equilibrio al pasar a través de la torre.

5.4 ¿QUE ES EL MONITOREO EN LA INYECCIÓN DE AGUA?[40]

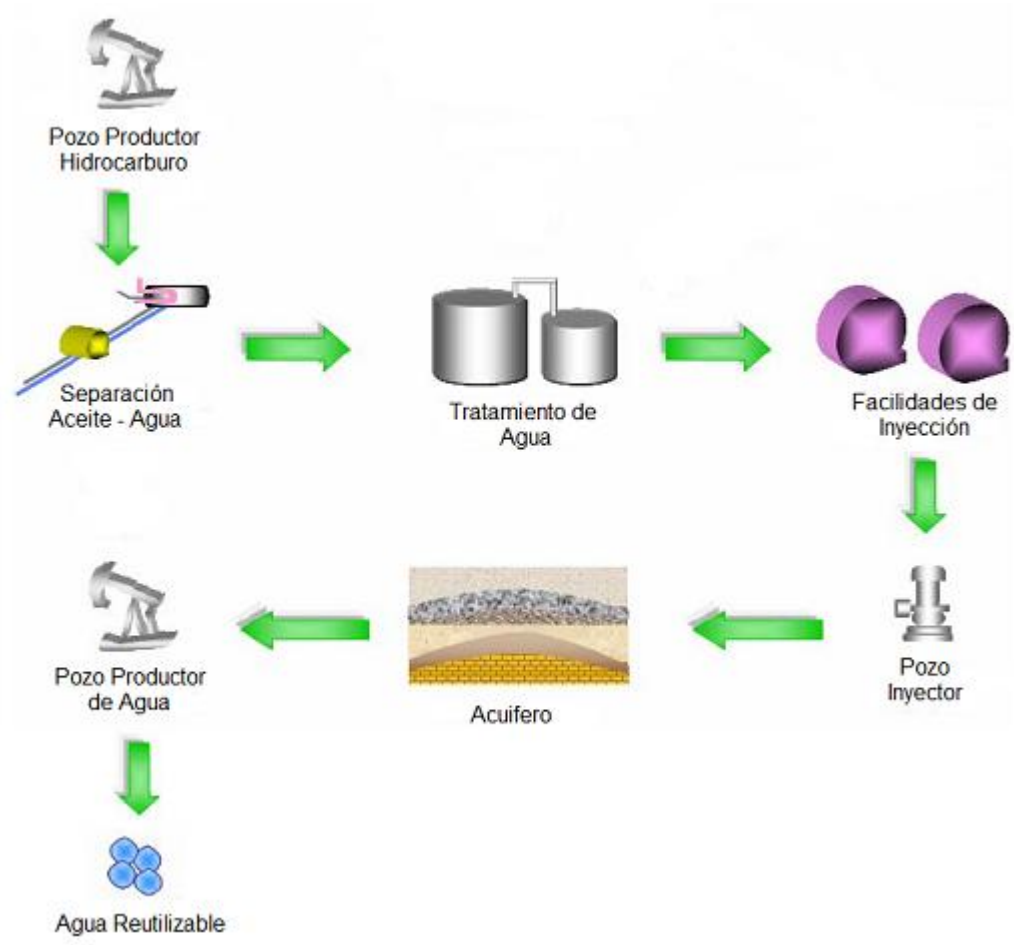
En un proceso de almacenamiento de agua subterránea ocurre generalmente de forma lineal y/o secuencial, como se muestra en la ***figura 31***, donde se ven los puntos del sistema que son monitoreados, desde el acuífero, los pozos inyectores y productores, las facilidades y tratamiento del agua; se involucran todas las partes del proceso de inyección y por lo tanto, deben estar incluidas dentro del plan de monitoreo y como ocurre de forma secuencial, un evento que ocurra en un punto afecta a los demás de forma directa y específica.

Los puntos controlados dentro del monitoreo de inyección de agua se pueden dividir en dos categorías principales: el área del subsuelo, incluye el yacimiento, la cara del pozo y el estado mecánico de estos mismos y el área de superficie,

[40] SILIN, D. B. Monitoring Waterflood Operations: Hall´s Method Revisited. SPE. 93879, 2005.

contiene las facilidades empleadas para la distribución e inyección del agua, además de equipos de tratamiento y almacenamiento de fluidos. Partiendo de estas categorías, los puntos de aplicación del monitoreo, se dividen en cuatro: yacimiento, pozos de inyección y producción, facilidades de superficie y agua de inyección y producción; en cada uno de ellos realizan diferentes procedimientos usando herramientas y técnicas, para un monitoreo y seguimiento eficiente.

Figura 31. Puntos del sistema a monitorear.



Fuente: Modificado de Integrated Waterflood Asset Management. Ganesh Thakur y Abdus Satter.

5.5 MONITOREO EN SUPERFICIE[41]

Las herramientas de monitoreo de la inyección de agua son capaces de adquirir información del proceso, esto se realiza por medio de pruebas, muestreos y operaciones técnicas; en superficie, la adquisición de información gira en torno a la calidad del agua, su valoración y tratamiento garantizan el éxito del proceso, la información adquirida durante el proceso debe ser consistente y debe obtenerse en todos los puntos, abarcando desde el agua que se va a inyectar, hasta el agua de producción.

El monitoreo en superficie, implica la vigilancia de las facilidades de inyección, tratamiento y almacenamiento, además del muestreo del agua de inyección y producción en diferentes puntos del proceso; el conjunto de facilidades de superficie agrupa todos los equipos necesarios para manejar el agua y los demás fluidos producidos o de inyección. El agua circula por todo el sistema junto con las sustancias que puedan ser dañinas, por esta razón, las pruebas que se le realizan, dependen del punto de muestreo, del estado del equipo y del agua que circule por allí, ya sea de inyección o de producción.

A continuación, se van a describir una serie de herramientas, aplicables en superficie e indispensables en el proceso de monitoreo, seguimiento y control de la inyección de agua.

5.5.1 Calidad del agua.[42] La calidad del agua es la parte más importante del proceso y se debe ser cuidadoso en las propiedades de esta, ya que pueden causar efectos en el acuífero, los pozos, facilidades de superficie y en el posterior uso potable, no existe una guía definida o generalizada sobre los indicadores aceptables de calidad del agua para un proceso de inyección, esto varía con las

---

[41] TALASH, A. W. An Overview of Waterflood Surveillance and Monitoring. SPE, Mobil E&P Services Inc. 1998.

[42] PATTON, Charles C. Water Quality Control and Its Importance in Waterflooding Operations. SPE 18459, September 1988.

características propias de cada yacimiento y en el posterior uso que se le dará. Por medio de pruebas, se deben establecer los índices de calidad aceptable para el campo y para su posterior uso, los cuales permitirán evaluar la calidad del agua durante el desarrollo del proceso.

La calidad del agua de inyección y producción, se evalúa por medio de muestreo y pruebas en todo el sistema de inyección, los tratamientos aplicados varían dependiendo de la composición del agua y de las características de la formación a la cual se va a inyectar, generalmente no se realizan todos los análisis, sin embargo, mantener la calidad del agua en los topes más altos optimizara el proceso.

En la ***tabla 10*** se resumen los tipos de técnicas normalmente utilizadas en el monitoreo para llevar a cabo el análisis de una muestra de agua en el proceso de inyección.

Los análisis de agua son rutinarios y deben llevarse a cabo en el sitio de la muestra o en laboratorio, la calidad del agua puede ser monitoreada con métodos de muestreo discretos, individuales o continuos, los datos recolectados usualmente incluyen análisis químico del agua (iones disueltos como sodio, calcio, magnesio, bario, hierro, cloruros, bicarbonatos y sulfatos), distribución de tamaño de sólidos suspendidos, cantidad total y tipo de sólidos, concentración de grasas y aceite, corrosividad, medidas de gravedad específica, resistividad, pH, contenido de oxígeno y gases disueltos.

Cada sistema de inyección requerirá un programa de monitoreo para determinar la calidad del agua, el mejor procedimiento para un proyecto individual dependerá de las características del agua, acuífero y facilidades de producción e inyección. La selección del sistema de monitoreo más eficiente y económico puede determinarse por medio de un estudio integrado de las necesidades y de los diferentes equipos, teniendo en cuenta los puntos de muestreo a través de todo el

sistema de inyección de tal manera que permitan observar cambios periódicos en la calidad del agua.

Tabla 10. Métodos de Análisis del Agua

DETERMINACIÓN	MÉTODOS DE ANÁLISIS
Calcio	Titulación
Magnesio	Titulación
hierro	Calorímetro, Titulación
Bario y estroncio	Absorción atómica
Sodio	Fotómetro de llama, Gravímetro
Cloruro	Titulación
Carbonato	Titulación
Bicarbonato	Titulación
Sulfato	Medidor de turbidez, Gravímetro
Ph	Medidores digitales de pH (phmetro), carta cromática, papel tornasol
Concentración	Gravímetro (Filtro de membrana)
Distribución de tamaño de partículas	Contadores de tipo aleta, Dispersión ligera, Microscopios
Forma de las partículas	Electrón o Microscopia visual
Composición	Análisis varios
Turbidez	Medidor de turbidez
Temperatura	Termómetro
Gravedad especifica	Hidrómetro
Oxígeno disuelto	Medidor de oxígeno, Titulación, Carta de colores
Dióxido de carbono disuelto	Titulación
Sulfuro totales	Iodométrico, Calorimetro, Titulación
Aceite en el agua	Carta de colores, Espectroscopio, Gravímetro

Fuente. Oilfield Water Systems. Charles C. Patton. Oklahoma. 1981.

A continuación, se describirán todas las pruebas realizadas al agua para determinar su estado con relación a un mínimo denominado calidad del agua y cambios en su composición que puedan afectar el proceso de inyección de agua.

5.5.1.1 Temperatura. La temperatura del agua afecta la tendencia hacia la formación de escamas, el pH y la solubilidad de gases en ella; por otra parte, un parámetro como la gravedad específica también depende de la temperatura; su determinación en laboratorio se realiza por medio de termómetros.

5.5.1.2 Gravedad Específica. Se puede definir como la relación de la densidad de un líquido con otro tomado como referencia, que para el caso es el agua pura. La densidad es el peso por unidad de volumen de una sustancia, el agua pura pesa 1 g/ml, entonces una gravedad específica mayor a uno significa que la muestra de agua es muy densa, generalmente las aguas de interés en inyección contienen sólidos disueltos (iones, compuestos, gases) y siempre son más densas que el agua pura.

La magnitud de una gravedad específica es un índice directo de la concentración de sólidos disueltos en el agua, por tanto, la comparación de su valor para diferentes muestras proporciona una idea cualitativa de la cantidad relativa de sólidos en ellas. Este parámetro también es útil para comprobar los análisis realizados en laboratorio, si la cantidad de sólidos disueltos calculada en el laboratorio discrepa de la cantidad específica determinada por medio de una correlación de gravedad específica, existirá una alta probabilidad de error en la medida.

5.5.1.3 Carácter Ácido – pH. La determinación del pH en una solución, es un indicador de la tendencia de su acidez o alcalinidad, su interés en monitoreo de procesos de inyección de agua radica en adquirir información sobre la presencia de aguas corrosivas o formadoras de escamas en el sistema.

El pH es importante por varias razones, la solubilidad de las escamas es altamente dependiente del valor del pH, a mayores valores, se tendrá una mayor tendencia a la precipitación de estas (La presencia de carbonatos y bicarbonatos en el agua hacen que aumente el carácter básico de las aguas); por otra parte, si

el pH es bajo (más ácido) se disminuye la tendencia del agua a formar escamas, pero su carácter corrosivo aumenta.

En la mayoría de los campos petroleros, las aguas tienen un pH entre 4 - 8 y es necesario mantener un equilibrio en este valor con el fin de evitar las consecuencias de la corrosión y la precipitación de escamas.

Los métodos que permiten medir valores de pH son muy simples gracias a su practicidad, dentro de ellos se tienen: papel tornasol y carta cromática y los medidores electrónicos (phmetros), estos últimos miden la diferencia de potencial (en mV) entre dos electrodos (Indicador y de referencia que al ser introducidos en una solución establecen una celda galvánica) y luego es convertida en valores de pH.

5.5.1.4 Contenido de Aceite. Pequeñas cantidades de aceite en el sistema de inyección raramente ocasionan problemas de taponamiento a menos que contengan una cantidad razonable de asfáltenos, parafinas u otros hidrocarburos sólidos. Sin embargo, las gotas de aceite se encuentran usualmente adheridas a los sólidos contenidos en el agua, estas tienden a disminuir la densidad efectiva de las partículas reduciendo la efectividad del proceso de sedimentación, por esta razón y debido a la pérdida de aceite, generalmente se remueve del agua que está siendo tratada.

El aceite contenido en el agua puede causar disminución en la inyectividad gracias a varios efectos, dentro de ellos: causa bloques de emulsión en la formación, allí sirve como pegamento para ciertos sólidos, como sulfuro de hierro, aumentando de esta manera la eficiencia del taponamiento. Si se está inyectando agua en un acuífero sin saturación inicial de aceite, el aceite contenido en el agua puede atraparse en los poros de la roca alrededor de la cara del pozo, esto crea una saturación de aceite, la cual reduce inyectividad.

Es necesario realizar pruebas de análisis para determinar el contenido de aceite en cualquier agua del sistema sin importar su origen, ya que existen diversas formas por las cuales el agua puede contaminarse con aceite. Los análisis de composición química del agua descritos anteriormente permiten identificar los valores de concentración de hidrocarburos, esto con el fin de establecer el nivel de perjuicio que puede traer su presencia en el agua que fluye por el sistema.

5.5.1.5 Contenido de Gases. Dependiendo de la concentración de algunos gases en el agua, se generan efectos adversos en las líneas de flujo y en las facilidades de superficie en general, se analizan a continuación, las pruebas realizadas para medir el contenido de Oxígeno y gases ácidos como H_2S y CO_2, en el agua de inyección y producción.

5.5.1.5.1 Contenido de O_2. Las fuentes de agua superficiales, normalmente se encuentran saturadas con oxígeno, otras fuentes pueden adquirirlo durante el proceso, éste contribuye significativamente a la formación de aguas corrosivas, también puede implicar precipitaciones de óxidos de hierro insolubles que provocarán severos taponamientos si existe hierro disuelto en el agua y entra oxígeno en el sistema, por estos motivos, es deseable contar con una técnica que permita su remoción. Las pruebas utilizadas para determinar la presencia de O_2 en el agua incluyen: medidores de oxígeno, titulaciones y cartas de colores (Determinar carácter básico).

5.5.1.5.2 Contenido de H_2S. Su presencia en el agua incrementa su corrosividad, puede estar presente naturalmente en el agua o ser generado gracias a la acción de bacterias sulfato-reductoras. Si un agua dulce (libre de H_2S) empieza a mostrar trazas de H_2S, indica la presencia de bacterias en alguna parte del sistema (líneas de flujo, tanques, etc.) Para determinar la concentración de H_2S en el agua, se hace uso de pruebas tales como: titulación, métodos iodométrico y colorimétrico.

5.5.1.6 Contenido de Sólidos. El agua que circula por todo el sistema de facilidades de superficie y en especial la proveniente de los pozos productores, contienen dos tipos de sólidos, en suspensión y disueltos; su presencia en el agua puede causar problemas como:

- Taponamiento de líneas, válvulas u otras facilidades de superficie.
- Erosión en válvulas, bombas y líneas.
- Taponamiento de la pared del pozo y de la formación.
- Precipitación de escamas.

Para determinar la presencia de estos sólidos en el agua, se deben realizar diferentes pruebas, dependiendo también del tipo de sólidos que se deseen analizar.

5.5.1.6.1 Sólidos Disueltos. Son aquellos cationes y aniones que se encuentran presentes en el agua, generalmente se refieren a la suma de las concentraciones individuales de los iones (STD: sólidos totales disueltos), siendo los más comunes, el cloro, el sodio y el hierro. Las pruebas para determinar la concentración de iones en solución en el agua, principalmente son: titulación, método colorimétrico, absorción atómica, fotómetro de llama, gravímetro y medidor de turbidez.

5.5.1.7 Contenido Bacterial.[43] La presencia de poblaciones bacterianas en el sistema puede generar problemas de corrosión en los equipos y taponamiento en la formación y líneas de flujo, por tal motivo, el conocimiento del comportamiento de los microorganismos en el agua es importante, así que es necesario incluir en los programas de monitoreo de agua, pruebas que permitan establecer los efectos de su presencia.

[43] CHEN, E. Y. y CHEN, R. B. Monitoring Microbial Corrosion in Large Oilfield Water Systems. SPE 11509, 1984.

El agua fresca y las salmueras pueden contener bacterias que generan problemas severos, si se sospecha de su presencia, es necesario tomar muestras de agua para analizarlas en el laboratorio y determinar su tipo.

Los programas de monitoreo para determinar actividad bacterial en el agua exigen procesos de muestreo, identificación y cuantificación de estos microorganismos, se hace un análisis básico de una muestra de agua, que encierra estudios microscópicos en donde es posible identificar bacterias del hierro y formadoras de películas. Luego, se realizan actividades de cultivo, las cuales constituyen una de las técnicas más utilizadas en el análisis bacterial del agua, pues permiten identificar el tipo, la cantidad y las etapas de crecimientos de estos organismos; una muestra de agua que pueda contener bacterias, se coloca en un líquido conocido "medio de cultivo", el cual es una solución que contiene alimento que permitirá el adecuado desarrollo y crecimiento de los microorganismos de interés, cada tipo de bacteria requiere un medio de cultivo diferente, el hecho que estos organismos se reproduzcan y multipliquen en un medio especifico facilitan el estudio de su metabolismo en determinadas condiciones en el yacimiento.

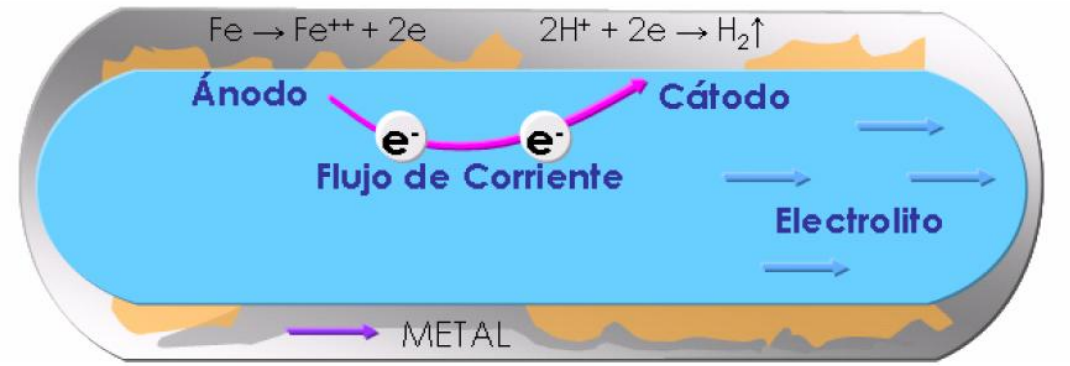
Existen diversos procesos de laboratorio para identificar y cultivar bacterias, pero estos no permiten cuantificar su concentración en una muestra dada. En campo se utilizan técnicas que permiten cultivar muestras de agua.

5.5.2 Corrosión.[44] La mayoría de los metales se encuentran en la naturaleza como óxidos o sales metálicos, la producción de metales puros requiere la adición de gran cantidad de energía, ésta es almacenada y se encuentra disponible para suministrar la fuerza necesaria que se requiere para que el metal regrese a su estado natural. La corrosión es un proceso electroquímico, es decir que encierra el flujo de corriente eléctrica gracias a la formación de un circuito eléctrico en el

[44] RUSELL, J. W. Plastic Coating for Corrosion Control in Petro and Production Industry. SPE 7771, 1979.

sistema por donde fluye el agua, el circuito eléctrico completo de la corrosión consta de cuatro componentes, tal como se observa en la ***figura 32***.

Figura 32. Celda de Corrosión en una Línea de Flujo



Fuente: RUSELL, J. W. Plastic Coating for Corrosion Control in Petro and Production Industry. SPE 7771, 1979.

El **ánodo** es la porción de la superficie del metal que es corroída debido a la pérdida de electrones, el **cátodo** es la parte de la superficie del metal que no es disuelta, donde se lleva a cabo la reacción química necesaria para completar el proceso de corrosión. Para complementar el circuito eléctrico, la superficie del metal (ánodo y cátodo) debe ser cubierta con una solución que permita la conducción de electrones, tal solución es llamada **electrolito**, el agua es un electrolito que aumenta su conductividad eléctrica a medida que se incrementa la cantidad de iones y sales disueltos en ella, el electrolito conduce la corriente desde el ánodo hacía el cátodo.

El ánodo y el cátodo deben permanecer conectados por algún elemento que permita la conducción de electrones, con el fin de completar el circuito; en el caso de las superficies de metal corroídas, el metal actúa por sí mismo como **conductor eléctrico.**

La combinación de ánodo, cátodo, electrolito y conductor eléctrico se denominada celda de corrosión. Este proceso puede ser llevado a cabo en puntos aleatorios

del metal o en toda la superficie de él, generando grandes problemas para el proceso de inyección de agua, pues su presencia altera el adecuado desempeño de los equipos por donde fluye el agua. El carácter corrosivo del agua es adquirido debido a varios factores, dentro de los cuales se tienen:

- La presencia de iones disueltos que disminuyen el pH, generan aumento en la tasa de corrosión.
- Altas concentraciones de oxígeno, dióxido de carbono o sulfuro de hidrogeno disueltos constituyen la primera causa de los mayores de problemas de corrosión.
- Al aumentar la temperatura del agua, se aumentan las tasas de corrosión debido a que se incrementan las velocidades de las reacciones envueltas en el proceso.
- La presión está relacionada con su efecto en la solubilidad de los gases disueltos, a mayor concentración de gases en solución, a medida que se incrementa la presión aumentan las tasas de corrosión.
- Para aguas con bajas velocidades o estancadas, se tienen en general bajas tasas de corrosión, pero se presenta corrosión por picadura; a altas velocidades y/o presencia de sólidos suspendidos o burbujas de gas se genera corrosión por erosión.
- Los sistemas pueden contener áreas adyacentes las cuales están expuestas a diferentes velocidades para el agua, si no existe oxígeno disuelto en ella, las áreas de alta velocidad son anódicas al área de baja velocidad y serán corroídas, pero si por el contrario, existe oxígeno disuelto en el agua, las áreas de baja velocidad que reciben menos oxígeno actuarán como ánodos y se corroerán.

El monitoreo de corrosión en los equipos que se encuentran en contacto con el agua se lleva a cabo utilizando pruebas denominadas *Ensayos No Destructivos*

(END) y tienen por objeto el análisis de materiales y componentes sin que se vean afectadas sus propiedades físicas y químicas, permitiendo que puedan utilizarse luego de su realización. El método más común para monitorear corrosión en los procesos de inyección de agua es la utilización de cupones, seguidos en orden de uso por las pruebas electroquímicas y las pruebas de ultrasonido, desarrolladas últimamente.

5.6 MONITOREO EN SUBSUELO[45]

El ciclo del monitoreo requiere la adquisición de datos confiables del avance del proyecto, y para esto, se emplean herramientas técnicas, encargadas de obtener información que posteriormente servirá para implementar diversos tratamientos, ya sea en los elementos de subsuelo o de superficie; se aplican procesos de monitoreo sobre todos los puntos para lograr su optimización, y se emplean procedimientos en sitios estratégicos de vigilancia a través del uso de un conjunto de herramientas que permite realizar la evaluación del avance del proyecto.

Usando las herramientas de subsuelo se busca determinar el buen estado de los pozos y de la formación que existe entre inyectores y productores.

Las herramientas de subsuelo se pueden clasificar en pruebas de presión, registros de producción, perfiles de flujo (Perfiles de inyección y de producción) y trazadores entre pozos.

Cada una de las herramientas utilizadas tiene un objetivo específico que en general afecta el proceso de inyección y son parte vital del programa de monitoreo, seguimiento y control, por esto, se hace necesario el conocimiento de su funcionamiento, aplicaciones y ventajas de su aplicación.

---

[45] COBB, W. M. & SMITH, J. T. An Investigation of Pressure Buildup Test in Bounded Reservoirs. SPE 5133, 1974.

5.6.1 Pruebas de presión. Un programa de monitoreo, seguimiento y control en la inyección de agua, requiere la identificación de las propiedades del acuífero, las condiciones de los pozos y las prácticas operacionales; para desarrollar un plan de monitoreo se deben incluir las pruebas de presión en los pozos, ya que pueden proveer o confirmar la información de las condiciones del acuífero que de otra forma no podría ser obtenida.

Las pruebas de presión permiten determinar estas condiciones, además, el análisis y evaluación de estas pruebas es valioso para diagnosticar problemas y cuantificar el comportamiento de la inyección de agua, de aquí es posible desarrollar recomendaciones y ajustes a las operaciones dentro del proceso con el fin de lograr que este sea más eficiente. Los programas de pruebas en pozos proveen, entre otra, la información listada a continuación:

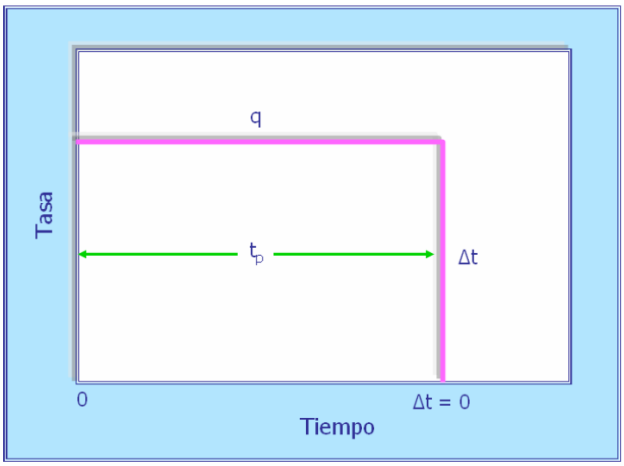
- Permeabilidad Efectiva de la Formación
- Existencia de Fracturas Naturales
- Existencia de Condiciones de Fractura en la Pared de Pozo
- Espesor Efectivo de la Formación
- Existencia de Gradientes de Presión
- Evidencia de Daño en la Formación
- Pérdidas de Agua Inyectada en otras Zonas
- Llenado Excesivo de la Pared de Pozo
- Escapes en Casing / Tubing
- Muestras de agua
- Volúmenes de agua
- Presiones (Superficie, Fondo)
- Datos para Correlacionar Estratificación de la Formación

Es importante realizar un programa de pruebas de presión antes y durante la inyección para determinar la condición del acuífero, dentro de las pruebas más comunes en los procesos de inyección de agua se encuentran:

- Ascenso de Presión, PBU
- Prueba Falloff
- Prueba Step – Rate
- Pruebas Pulso
- Pruebas de Interferencia
- Evaluación de Presiones de Fondo
- Evaluación de Temperatura de Fondo
- Registros de Cementación
- Registros de Rayos Gamma

5.6.1.1 Prueba de Ascenso de Presión (PBU). Es la prueba de transiente de presión utilizada con mayor frecuencia, principalmente para estimar valores de permeabilidad y daño de la formación. Básicamente, se lleva a cabo en pozos productores, donde se mantiene una tasa constante por algún tiempo y luego se cierran (desde superficie) con el fin de registrar valores de presión (en fondo) como una función del tiempo ***(Figura 33)***. A partir de estos datos, se estiman valores de permeabilidad de la formación, presión en el área de drenaje y factor de daño, también permite determinar presencia de heterogeneidades en el acuífero o límites de él.

Figura 33. Tasa histórica en una Prueba de Ascenso de Presión



Fuente: Well Testing. John Lee. Society of Petroleum Engineers of AIME, 1982.

El método más utilizado para el análisis de datos corresponde al procedimiento gráfico propuesto por Horner para yacimientos actuando como infinitos, aunque luego fue extendido el uso de este tipo de gráficos para yacimientos finitos (con límites); otra técnica de análisis importante para pruebas de ascenso de presión, emplea curvas tipo desarrolladas para determinados casos en particular.

Para utilizar el método propuesto por Horner, es importante tener en cuenta que dentro de su desarrollo se realizaron las siguientes asunciones tanto para el yacimiento como para sus fluidos:

- Yacimiento actuando como infinito, homogéneo e isotrópico.
- Fluido poco compresible.
- Fluido en una sola fase con propiedades constantes en el tiempo.

Cualquier daño de pozo o estimulación se considera centrado en un espesor de cero en la pared del pozo; en el instante del cierre, el flujo en la pared del pozo cesa totalmente.

5.6.1.2 Prueba de Presión Falloff. Es una prueba análoga a una de ascenso de presión, pero ésta se lleva a cabo en pozos inyectores, se cierra el pozo luego de haber inyectado a una tasa conocida y se registran las variaciones de presión en el acuífero debidas al agua que fluye a través de él.

El período de una prueba de falloff es afectado por la magnitud, la longitud y las fluctuaciones de la tasa en el período de inyección, ya que, en este caso, se registran datos de presión y tiempo transcurrido durante el cierre; el período de la inyección debe alcanzar flujo radial antes del cierre, para que de esta manera la prueba se realice dentro de este periodo, pues los modelos de análisis asumen esta condición.

5.6.1.3 Step Rate Test (SRT). Es una prueba de presión utilizada para determinar la presión de formación y de fractura, para realizarla, es necesario cerrar o estabilizar el pozo a una pequeña tasa constante; idealmente, el período de cierre debe ser lo suficientemente largo para permitir que la presión de fondo de pozo se estabilice cerca de la presión estática de la formación, pero si se estabiliza el pozo con una pequeña tasa constante, es necesario mantenerla por un tiempo muy largo con el fin de alcanzar la condición de estado estable o pseudoestable.

La prueba SRT consiste en una serie de inyecciones a tasa constante, incrementando con el tiempo desde una tasa baja hasta una alta, controlando cada paso de tasa constante, normalmente con un periodo de tiempo equivalente entre ellas. En cada paso, se registran las tasas de inyección y las presiones, con el fin de establecer la presión de fractura, es importante resaltar que el análisis de sus resultados se encuentra influenciado por efectos de almacenamiento en la pared de pozo.

La prueba Step Rate, es el primer método que debe utilizarse para definir la máxima presión de seguridad o la llamada “extensión o propagación de fractura”,

eliminando el riesgo de un posible fracturamiento de la roca (presión de fractura) durante el proyecto de inyección de agua.

5.6.1.4 Prueba de Interferencia.[46] Una prueba de presión se denomina de interferencia, cuando se mide la presión en un pozo diferente del productor, por lo tanto, es necesario como mínimo un pozo activo (productor o inyector) y un pozo de observación. La caída de presión causada por el pozo en producción sobre el pozo de observación cerrado interfiere con la presión de éste, razón por la cual se denomina Prueba de Interferencia.

Antes de emplear algún mecanismo de recobro, es de gran importancia conocer las propiedades del yacimiento, para verificar si hay continuidad entre el pozo inyector y productor; una prueba de interferencia tiene como objetivo principal, determinar si dos o más pozos pertenecen al mismo acuífero, en caso de ser cierto, es posible obtener datos adicionales de este, que no se podrían obtener por las pruebas convencionales de ascenso o caída de presión, tales como, la continuidad del acuífero.

Si los pozos que rodean al observador operan selectivamente durante la prueba, se puede estimar la porosidad, la anisotropía (permeabilidad direccional, vertical u horizontal en una formación heterogénea y homogénea separada o no por barreras impermeables), valores de transmisibidad, almacenamiento y la orientación de fracturas tanto hidráulicas como naturales.

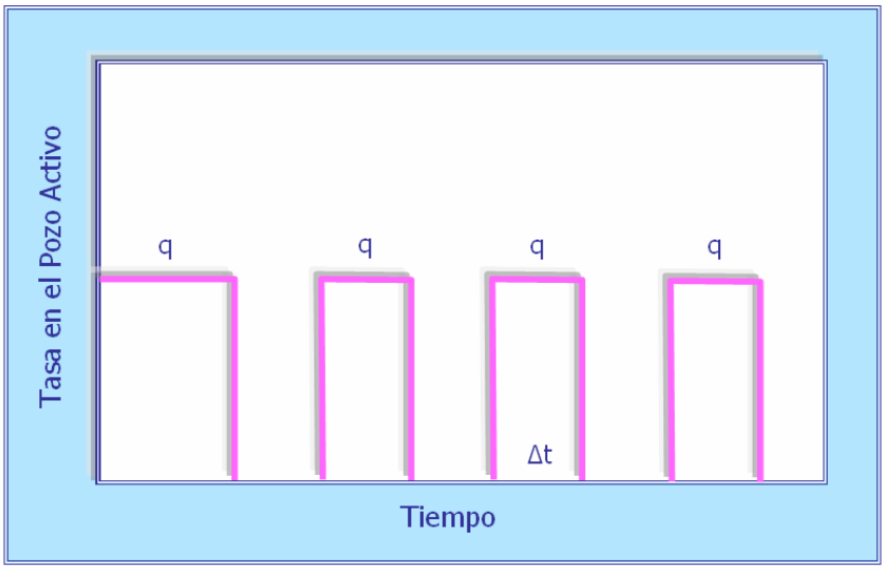
La comunicación entre pozos es la principal aplicación de las pruebas de interferencia y la más sencilla, pues consiste en cerrar el pozo observador, esperar a que la presión se estabilice, posteriormente poner a producir el pozo activo y esperar a que el transiente de presión llegue al pozo observador para obtener la

[46] KAMAL, M. Interference and Pulse Testing – A Review. SPE 10042, 1983.

lectura con la herramienta, y de esta forma realizar el ajuste pertinente, para analizar la conexión entre los pozos.

5.6.1.5 Pruebas Pulso. Este tipo de pruebas tienen los mismos objetivos de una prueba de interferencia, determinar si existe comunicación entre un par de pozos y estimar permeabilidad y capacidad de almacenamiento en el área de los pozos probados. Estas pruebas se realizan enviando una señal o secuencia de pulsos desde un pozo activo (productor o inyector) hacía un pozo de observación cerrado, la secuencia de pulsos es creada produciendo (o inyectando) desde el pozo activo, posteriormente cerrándolo y repitiendo esa secuencia en un patrón regular ***(Figura 34)***.

Figura 34. Secuencia Típica de Tasas en una Prueba Pulso



Fuente: Well Testing. John Lee. Society of Petroleum Engineers of AIME, 1982.

Por medio de la secuencia de pulsos se puede determinar el efecto de un pozo activo en un pozo de observación ubicado en una zona intermedia, allí se establecen las tendencias en presión y las perturbaciones aleatorias.

6. ESTRATEGIAS PARA LA REUTILIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES PREVIAMENTE TRATADAS, ALMACENADAS Y SU POSIBLE IMPLEMENTACIÓN EN ALGUNOS CAMPOS COLOMBIANOS.

Luego de los tratamientos adecuados, el agua de producción está lista para ser reutilizada en procesos industriales y agropecuarios que se desee, pero Colombia ocupa el sexto puesto a nivel mundial en recursos hídricos con 2231 km^3/año[47], el criterio de cálculo es, el total de aguas superficiales más el total de aguas subterráneas menos el solapamiento entre aguas superficiales y subterráneas. Por lo que su utilización inmediata es innecesaria, así que el líquido tratado se inyecta en el subsuelo para almacenarlo y ser utilizado en situaciones difíciles como en el caso de los fenómenos naturales, sequias extremas (fenómeno del niño).

En este capítulo se tratará los diferentes campos de utilización de las aguas residuales del petróleo previamente tratadas y almacenadas, su posible implementación en algunos campos colombianos, que se han seleccionado por su gran producción de agua, el tipo de yacimiento y su mecanismo de produccion.

6.1 USO INDUSTRIAL

En las áreas donde los recursos tradicionales de aguas superficiales y subterráneas son escasos el agua asociada, tratada y almacenada en acuíferos podría convertirse en un recurso de reposición importante en muchos procesos industriales, siempre y cuando la calidad del agua siga siendo adecuada. El grado de tratamiento previo requerido depende de la calidad del agua y el uso previsto.

[47] BOGGIANO, Miguel Angel, Los 10 países con más reservas de agua del mundo, 16-Nov-2013.

El agua de producción ya está siendo utilizada en varios procesos industriales como en la generación de energía.[48]

6.1.1 Uso en Campo. Muchos pozos de gas natural (Yacimientos de gas no convencional) deben ser fracturados hidráulicamente para mejorar las operaciones de producción. Este proceso requiere cientos de miles de barriles de agua, como es el caso de los campos Barnett Shale en Texas, Marcellus, Fayetteville y Hanesville donde los suministros locales de agua no son suficientes para satisfacer toda la demanda de agua que se requiere para procesos de fracturamiento. Además al retornar el agua que se utiliza para este proceso, es reciclada y reutilizada para nuevos trabajos en esta área.[49]

También en la cuenca del Golfo de San Jorge y el área del Cerro Dragón a lo largo de Patagonia en el sur de Argentina, se requieren cerca de 5,7 millones de galones de agua por día para 760 trabajos de fracturamiento que se desarrollan desde 2010.[50]

6.1.2 Refrigeración y Electricidad. Otro uso potencial del agua de producción es la refrigeración; según el Servicio Geológico de EE.UU.[51] En la industria de EE.UU. se retiraron alrededor de 136 mil millones de galones por día (más de 3 mil millones de bbl / d) de agua dulce para la refrigeración de centrales eléctricas ***(figura 35)***, las fuentes de agua convencionales y subterráneas ya no son suficientes para satisfacer las crecientes necesidades de plantas de energía en muchas partes del país, por tanto el agua de producción representa una fuente de

---

[48] SIMS, John J. and PUCKORIUS, Pul R. A Practical Guide to Water Recycle-Reuse. Paper 484, 1995.

[49] Arthur, J. D. and Coughlin, B. J. Cumulative Impacts of Shale- Gas Water Management: Considerations and Challenges. SPE 142234, 2011.

[50] Bonapace, J. and Giglio, M. Water Conservation: Reducing Fresh Water Consumption by Using Produced Water for Base Fluid in Hydraulic Fracturing- Case Histories in Argentina. SPE 151819, 2012.

[51] HUTSON, S.S, *et al*. Estimated Use of Water in the United States in 2000, 2004.

gran volumen que podría servir como agua de reposición para una planta de energía, sin embargo se debe tener en cuenta la distancia para transportar este volumen de agua, ya que si es muy extensa se deben evaluar los factores económicos que implica hacerlo.

Figura 35. Torres de refrigeración

Fuente: Veil, J.A., D. Elcock, y R.J. Redweik, Jr. A White Paper Describing Produced Water fromProduction of Crude Oil, Natural Gas, and Coal Bed Methane, 2007.

En 2006, el departamento de Energía de EE.UU. financió a un grupo de investigadores dirigido por el EPRI (Electric Power Research Institute) para evaluar la viabilidad de la utilización del agua de producción para satisfacer hasta el 25% de las necesidades de refrigeración en la generación de energía en la estación de San Juan en el noroeste de Nuevo México ***(figura 36)***; la planta requiere cerca de 500,000 bbl / d de agua de reposición para reponer el agua perdida por evaporación o purga.[52]

[52] CASTELLANOS OBREGÓN, Rafael y GONZÁLEZ DONIS, Virginia. Dirección General de PlanificaciónEnergética. Prospectiva del Sector Eléctrico 2006-2015, 2006.

Por ejemplo, la Estación Generadora de San Juan, ubicada cerca de Farmington, tiene una capacidad de producción de 1,800 megavatios de energía eléctrica. Para enfriar y condensar el agua utilizada en el proceso de generación termoeléctrica se necesitan cantidades significativas de agua. En el futuro, el agua de producción podría complementar la demanda diaria de agua de enfriamiento**.**

Figura 36. Central Eléctrica Alimentada con Carbón en Nuevo México, EUA.

Fuente: Richard, Arnold. Manejo de la Producción de Agua: De Residuo a Recuso. Oilfiel Rewiew Schlumberger, 2010.

En al menos un caso, el agua asociada se utiliza para la generación de vapor. A partir de una instalación de ChevronTexaco en el centro de California se envían a una planta de cogeneración, cerca de 360.000 bb / d de agua de producción, los cuales sirven como fuente de agua de alimentación de calderas.[53]

6.1.3 Control de Polvo. En la mayoría de los campos de petróleo, los caminos son de difícil acceso y la mayoría de ocasiones no están pavimentados, por tanto los operadores rocían el agua asociada por caminos de tierra para controlar el polvo. Esta práctica suele ser controlada de manera que el agua no se aplique

[53] MUN C, Johnathan. Perfil Energético de América del Norte. 2006.

más allá de los límites de la carretera o dentro de las zonas de amortiguamiento alrededor de los cruces de arroyos y cerca de edificios, generalmente esta dispersión del agua se realiza mediante carrotanques que recorren estas carreteras lentamente hasta lograr cubrir el mayor porcentaje posible con el agua para evitar la propagación de polvo ***(figura 37)***.

La minería, el transporte de minerales son entre otras actividades que obligatoriamente desatan grandes cantidades de polvo. El agua de producción puede ser utilizada para controlar el nivel de polvo en esos lugares.[54] Los planes para el uso del agua de producción para mitigar la cantidad de polvo en la zona Norte del Complejo Rochelle (NA / RC) en el condado de Campbell, Wyoming, donde están las minas de carbón más grandes del mundo.

Figura 37. Camión Cisterna Utilizado para el Control de Polvo.

Fuente: VEIL, J.A, M.G. PUDER, D. ELCOCK, y R.J. REDWEIK, Jr, A White Paper Describing Produced Water from Production of Crude Oil, Natural Gas, and Coal Bed Methane, 2007.

[54] MURPHREE, P.A. Utilization of Water Produced from Coal Bed Methane Operations at the North Antelope/Rochelle Complex, Campbell County, Wyoming. 2002.

6.1.4 Control de Incendios. Los incendios a menudo se propagan durante la etapa más seca del año, en las zonas donde las condiciones de sequía son especialmente vulnerables. En muchos casos, los recursos hídricos en superficie y subterráneos son limitados o no están disponibles para la lucha contra el fuego. El agua de producción previamente tratada y almacenada puede ser una opción muy eficiente a la hora de combatir esta clase de problemas.

6.1.5 Otros. La lista de posibles usos industriales puede ampliarse, a medida que el costo del tratamiento de agua de producción disminuye, y la disponibilidad de suministros adicionales de agua dulce se agota con el tiempo. Otros sectores pueden recurrir al agua de producción como fuente para sus diferentes empleos. Un ejemplo podría ser el empleo de esta agua para lavados de vehículos de transporte entre muchos usos más por esta razón, el agua de producción previamente tratada y almacenada puede ser una opción muy eficiente.

6.2 USO AGROPECUARIO

Dentro del uso agropecuario que tiene el agua de producción, se encuentran el uso agrícola para el cual se deben tener en cuenta los parámetros de calidad del agua y la normatividad que rige en este campo; además se tienen otro empleos del agua de producción como: uso en ganadería, riego de vida silvestre y hábitat, construcción de humedales y también el uso en acuicultura, cada uno con sus parámetros para poder disponerla satisfactoriamente.[55]

6.2.1 Uso Agrícola. Muchos yacimientos de petróleo y gas se encuentran en las zonas del país que se caracterizan por climas áridos y los escasos recursos de agua dulce; por esta razón el agua de producción previamente tratada y almacenada puede ser una opción muy eficiente si se encuentra de acuerdo al

[55] HOLLIDAY, George. A Need for Converting Produced Waters to Useable Waters. SPE 105094, 2007.

cumplimiento de los requisitos de calidad ofrece al sector agrícola la posibilidad de complementar y sustituir a los actuales suministros de agua.

La ***figura 38*** muestra algunos cultivos que se producen en el campo Castilla.

Figura 38. Óptimo Crecimiento de Cultivos Empleando Agua de Producción.

Fuente: Ecopetrol. Distrito de Adecuación de Tierras Castilla, 2012.

6.2.2.1 Parámetros para el Empleo de Agua de Producción en Uso Agrícola.

- Calidad del Agua. El agua utilizada para el riego puede variar drásticamente en calidad dependiendo del tipo y cantidad de sales disueltas. Las sales están presentes en el agua de riego en cantidades relativamente pequeñas pero significativas, estas se originan en disolución o meteorización de las rocas y el suelo, incluyendo la disolución de los minerales en el suelo como cal, yeso, entre otros.

  Estas sales están presentes en el agua donde quiera que esta se utilice. La idoneidad del agua de riego se determina no sólo por la cantidad total de sal presente, sino también por el tipo de sal, se debe analizar

cuidadosamente el agua de irrigación con el fin de evitar problemas durante su empleo a largo plazo.[56]

- Salinidad. Un problema asociado a la salinidad ocurre cuando esta se acumula en gran cantidad a la zona radial del cultivo, generando un déficit en el rendimiento, estas reducciones de rendimiento se producen cuando las sales se acumulan en la zona de la raíz, llegando a un punto en el que el cultivo ya no es capaz de extraer el agua necesaria de la solución del suelo salado, ocasionando una falta de agua durante un período prolongado de tiempo. Si la absorción de agua se reduce considerablemente, la planta disminuye su tasa de crecimiento. Los síntomas de las plantas son similares en apariencia a las de la sequía, tales como el marchitamiento, o un tono más oscuro, color verde azulado y hojas cerosas. Los síntomas varían con la etapa de crecimiento, siendo más notorio si las sales afectan a la planta durante las primeras etapas de crecimiento. En algunos casos, leves efectos de la sal pueden pasar totalmente inadvertidos debido a una reducción en el crecimiento uniforme en todo un campo.

- Tasa de Infiltración de Agua. Un problema relacionado con la infiltración del agua se produce cuando la velocidad de infiltración normal se reduce significativamente y el agua permanece sobre la superficie del suelo por un tiempo prolongado o se infiltra muy lentamente. Aunque la tasa de infiltración de agua en el suelo es muy variable y puede ser fuertemente influenciada por la calidad del agua de riego, factores tales como la estructura del suelo, grado de compactación, contenido de materia orgánica y la composición química también influyen mucho sobre la tasa de admisión.

[56] R.S. Ayers. Calidad del agua para la agricultura, de la Universidad de California en Davis, California, EE.UU. 2002.

Un volumen de agua con alta salinidad aumenta la infiltración, y un volumen de agua con baja salinidad o con un alto contenido en la relación sodio – calcio disminuye la infiltración. Ambos factores pueden operar al mismo tiempo; se pueden presentar también problemas secundarios si se riegan los cultivos excesivamente. Estos incluyen la formación de costras en los semilleros, crecimiento excesivo de hiervas (malezas), trastornos de la nutrición, el ahogamiento de la cosecha y la pudrición de las semillas.

- Toxicidad. Los problemas asociados a la toxicidad ocurren si ciertos componentes (iones) en el suelo o el agua son absorbidos por las plantas y se acumulan en concentraciones suficientemente altas como para causar daños en los cultivos, el grado de daño depende de la absorción y la sensibilidad de estos; los cultivos más afectados son los de tipo (arbóreos), son los más sensibles. El daño en este tipo de cultivo ocurre a menudo en un rango medio bajo en relación a estos iones. Por lo general, se distinguen por las quemaduras de las hojas y porque estas evidencian clorosis. Otros cultivos tienen un mayor grado de tolerancia a estas concentraciones, pero casi todos se dañan o mueren si se evidencia un exceso de iones tóxicos.

  Los iones de mayor grado de toxicidad son: cloro, sodio y boro; los problemas asociados a estos iones se pueden producir incluso cuando estos se encuentran en bajas concentraciones, la toxicidad a menudo está ligada a la taza de infiltración de agua.

- Varios. Otros problemas relacionados con la calidad del agua empleada para riego se producen muy frecuentemente, por tal razón es necesario mencionarlos. Altas concentraciones de nitrógeno en el agua pueden causar un crecimiento excesivo vegetativo, el alojamiento y la madurez del cultivo tardío, depósitos y sabores desagradables en las frutas o las hojas debido al riego por aspersión con altas concentraciones de bicarbonato en el agua. El agua que contiene altas concentraciones de yeso o de hierro generan anomalías asociadas al pH del agua.

A continuación, se muestra la normatividad nacional colombiana donde se exponen los valores admisibles de calidad del agua destinada para uso agrícola.

- Normatividad Vigente para el Uso del Agua en la Agricultura. Por agua de uso agrícola se entiende aquella empleada para la irrigación de cultivos y otras actividades conexas o complementarias que establezcan los organismos competentes.

Los criterios de calidad admisibles para las aguas destinadas a uso agrícola se presentan a continuación.

DECRETO 1594 DE 1984. Usos del Agua y Residuos Líquidos.

Artículo 37: Los valores asignados a las referencias indicadas en el presente capítulo se entenderán expresados en miligramos por litro, mg/L, excepto cuando se indiquen otras unidades.

Artículo 40: Los criterios admisibles para la destinación del recurso para uso agrícola son los siguientes ***(tabla 11)***:

Parágrafo 1: Además de los criterios establecidos en el presente artículo, se adoptan los siguientes:

a. El boro, expresado como B, deberá estar entre 0.3 y 4.0 mg/L dependiendo del tipo de suelo y del cultivo.
b. El NMP de coliformes totales no deberá exceder de 5.000 cuando se use el recurso para riego de frutas que se consuman sin quitar la cáscara y para hortalizas de tallo corto.
c. El NMP de coliformes fecales no deberá exceder 1.000 cuando se use el recurso para el mismo fin del literal anterior.

Parágrafo 2: Deberán hacerse mediciones sobre las siguientes características:

- ✓ Conductividad
- ✓ Relación de absorción de sodio (SAR)
- ✓ Porcentaje de sodio posible (PSP)
- ✓ Salinidad efectiva y potencial
- ✓ Carbonato de sodio residual

Tabla 11. Criterios de Calidad Admisibles para Aguas de Uso Agrícola.

REFERENCIA	EXPRESADA COMO	VALOR
Aluminio	Al	5.0
Arsénico	As	0.1
Berilio	Be	0.1
Cadmio	Cd	0.01
Cinc	Zn	2.0
Cobalto	Co	0.05
Cobre	Cu	0.2
Cromo	Cr^{+6}	0.1
Flúor	F	1.0
Hierro	Fe	5.0
Litio	Li	2.5
Manganeso	Mn	0.2
Molibdeno	Mo	0.01
Níquel	Ni	0.2
Ph	Unidades	4.5 – 9.0
Plomo	Pb	5.0
Selenio	Se	0.02
Vanadio	V	0.1

Fuente: Ministerio de Salud. Decreto 1594 de 1984.

6.2.2 Utilización del Agua Producida para Riego Subterráneo. Como se describió anteriormente, el agua de producción puede ser utilizada para el riego en superficie de vegetación si se combina con algunos elementos y nutrientes del suelo, tales como el yeso, este se disuelve en el agua de riego y aporta calcio

soluble para reducir al mínimo los efectos nocivos del alto contenido de sodio del agua de producción en la infiltración del suelo. El riego subterráneo utiliza una red de tuberías enterradas con una serie de goteros para aplicar el contenido de yeso, éste va directamente a los horizontes del suelo. Esta práctica permite que el agua de producción pueda ser utilizada para el riego hasta que el yeso en el subsuelo se agote, estos sistemas están diseñados para durar de 10 a 15 años, si se cuidan bien.

Los campos verdes en el fondo de la ***figura 39*** están recibiendo agua de producción a través del sistema de riego subterráneo.

Figura 39. Sistema de Riego Subterráneo con Agua de Producción

Fuente: Richard, Arnold. Manejo de la Producción de Agua: De Residuo a Recuso. Oilfiel Rewiew Schlumberger, 2010.

6.2.3 Utilización del Agua de Producción como Suministro para el Ganado. En las regiones áridas y semiáridas del mundo, la ganadería suele utilizar agua potable de baja calidad durante varios meses del año. Estos suministros se originan en pequeños pozos, canales, arroyos, etc., una alternativa novedosa es el empleo del agua proveniente de yacimientos de gas o de crudo. Tratándola debidamente esta puede suplir la demanda de agua para el suministro adecuado a los animales ***(figura 40)***. Los canales de riego con frecuencia sirven como fuentes

de bebida, pero otras fuentes, incluidos los suministros de mala calidad, se utilizan a menudo. Los requisitos de salinidad para el riego son más restrictivos que las de los animales, pero el agua altamente salina o que contiene elementos tóxicos puede ser muy perjudicial para la salud de los animales generando anomalías en la leche o carne o en el peor de los casos la muerte, haciéndolos no aptos para el consumo humano, otros síntomas son: molestias fisiológicas, disminución del apetito, que usualmente es causada por un desequilibrio en la relación con cualquier ion específico. Se ha demostrado que el agua que contiene un alto nivel de magnesio causa diarrea crónica.

Figura 40. Ganado bebiendo agua de Producción

Fuente: R.S. Ayers. Calidad del agua para la ganadería, de la Universidad de California en Davis, California, EE.UU. 2002.

6.2.3.1 Parámetros para el Empleo del Agua de Producción en Uso Pecuario.

- Fuentes de Agua. Se debe controlar la calidad del agua (salinidad y toxicidad) proveniente de los yacimientos para evitar las enfermedades en los animales, señaladas en esta sección.

- Cambios Estacionales. El contenido de sales en el agua suministrada en los bebederos para el consumo animal, puede cambiar su composición presentando un aumento de la salinidad debido a la evaporación ocurrida en los periodos de sequía, a elevados cambios de temperatura, mayor consumo de agua por el animal, debido al calor y al aumento de la ingesta de alimento seco.
- Edad y Estado de los Animales. Los animales lactantes, jóvenes y débiles son normalmente más susceptibles.
- Composiciones del Alimento. Suministrar pastos secos y alimentos para animales de alta suplementaria en proteínas en lugar de pastos verdes puede reducir la tolerancia a la salinidad, debido al menor contenido de humedad en los alimentos y mayor contenido de sal.
- Especies. La variación en la tolerancia a la salinidad del agua varía entre las especies animales.[57]

A continuación, se muestra la normatividad nacional colombiana donde se exponen los valores admisibles de calidad del agua destinada para uso pecuario.

6.2.3.2 Normatividad Vigente del Agua para Uso Pecuario. Se entiende como aguas para uso pecuario a aquellas empleadas para el abrevadero de animales, así como otras actividades conexas y complementarias que establezcan los organismos competentes.

Las aguas destinadas a uso pecuario deberán cumplir con los siguientes criterios de calidad ***(ver tabla 12)***:

Tabla 12. Criterios de Calidad para Agua de Uso Pecuario.

[57] R.S. Ayers. Calidad del agua para la ganadería, de la Universidad de California en Davis, California, EE.UU. 2002.

REFERENCIA	EXPRESADA COMO	VALOR
Aluminio	Al	5.0
Arsénico	As	0.2
Boro	B	5.0
Cadmio	Cd	0.05
Cinc	Zn	25.0
Cobre	Cu	0.5
Cromo	Cr^{+6}	1.0
Mercurio	Hg	0.01
Nitratos + Nitritos	N	100.0
Nitritos	N	10.0
Plomo	Pb	0.1
Contenido de sales	Peso total	3.000

Fuente: Ministerio de Salud. Decreto 475 de 1998.

Parágrafo 1: No se aceptará en el recurso película visible de grasas y aceites flotantes, presencia de material flotante proveniente de actividad humana, sustancias tóxicas o irritantes cuya acción por contacto, ingestión o inhalación, produzcan reacciones adversas sobre la salud humana.

Parágrafo 2: El nitrógeno y el fósforo deberán estar en proporción que no ocasionen eutrofización.

Teniendo en cuenta los factores mencionados y la necesidad de evitar cualquier riesgo de pérdida económica, la Academia Nacional de Ciencias (1972) de EUA experta en esta área estableció que, desde un punto de vista de la salinidad, el agua de bebida con una conductividad eléctrica (ECw) inferior a 5 dS / m ***(tabla 13)***, debe ser satisfactorio en casi cualquier circunstancia. Este reconoció que el malestar de menor importancia fisiológica puede ocurrir con el agua cerca de este límite.

Tabla 13. Guía de Calidad del Agua para el Ganado y Aves de Corral.

AGUA DE SALINIDAD (CE) (DS / M)	CLASIFICACIÓN	COMENTARIOS
< 1,5	Excelente	Útil para todas las clases de ganado y aves de corral.
1,5 a 5,0	Muy satisfactorio	Útil para todas las clases de ganado y aves de corral. Puede causar diarrea temporal en el ganado que no esté acostumbrado al agua; excrementos acuosos en aves de corral.
5,0 a 8,0	Satisfactorio para el ganado No apta para aves de corral	Puede causar diarrea temporal para los animales que no están acostumbrados a estas aguas. A menudo ocasiona heces líquidas, el aumento de la mortalidad y la disminución del crecimiento, especialmente en los pavos.
8,0 a 11,0	El uso limitado de la ganadería No apta para el de aves de corral	Se puede utilizar con seguridad razonable para el ganado lechero y carne de vacuno, ovejas, cerdos y caballos. Evitar el uso de animales gestantes o lactantes. No es aceptable para las aves de corral.
11,0 a 16,0	Un uso muy limitado	No apto para aves de corral y, probablemente, no apta para los cerdos. Un riesgo considerable en el uso de las vacas embarazadas o en periodo de lactancia, caballos u ovejas, o para la cría de estas especies. En general, el uso debe evitarse a animales de edades avanzadas, caballos, aves de corral y cerdos pueden subsistir con las aguas de este

		tipo bajo ciertas condiciones.
> 16,0	No se recomienda	Los riesgos con agua de alta salinidad son tan grandes que no pueden recomendarse para su uso bajo cualquier condición.

Fuente: Adaptado de la Academia Nacional de Ciencias de EUA (1972-1974).

6.2.3.3 Ejemplos de Aplicaciones de Agua para Uso Pecuario a Nivel Mundial. Ayers y Westcot, Fundación para la Investigación, EE.UU. Departamento de Energía, En su publicación "Calidad del Agua para la Agricultura, Riego y Drenaje", demostraron que a menudo el ganado puede tolerar una variedad de contaminantes en el agua, soportando niveles altos de sólidos disueltos totales (TDS), si se han acostumbrado pertinentemente. Cuando las concentraciones empiezan a aumentar, los animales muestran algún tipo de malestar. El agua con un nivel de TDS de menos de 1.000 ppm es considerada una fuente de agua excelente. El agua con niveles de TDS a partir de 1.000 hasta 7.000 ppm se puede emplear para el ganado, pero puede causar diarrea. Algunos proyectos se han enfocado en crear embalses o estaciones de riego para abastecer de agua potable el ganado.[58]

Ecopetrol junto con la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica) determinaron por medio de un monitoreo continuo y riguroso, el impacto de las aguas asociadas a la producción de petróleo en animales y especies vegetales.

Dicho estudio se inició de manera controlada en las instalaciones del Centro de Investigación La Libertad de Corpoica, ubicado muy cerca al área operativa de Ecopetrol en Villavicencio. En el monitoreo, se transportaban en carro tanques, en promedio, 3.000 galones de agua de la Estación de Recolección Apiay hasta el centro de investigación, donde eran dispuestos en tanques que luego los enviaban

[58] R.S Ayers and D.W. Westcot, Water Quality for Agriculture, 2003.

a bebederos para ganado y a minisistemas de riego para cultivos controlados de caña y sorgo, especialmente.

Una vez utilizadas estas aguas en cultivos y para dar de beber a los animales, se obtenían muestras de las plantas, del suelo y del ganado que eran sometidas a análisis de laboratorio. Lo que se quería determinar era el impacto de las aguas asociadas a la producción de crudo en los procesos de crecimiento y reproducción.[59]

Se estudiaron por ejemplo tres generaciones de ganado, haciendo un monitoreo continuo de tejidos y leche con el fin de determinar el posible impacto generado en estos animales por el consumo constante de las aguas asociadas. Tres años después de iniciar el monitoreo, Corpoica afirmó en comunicado de prensa que "no se encontró evidencia de residuos de hidrocarburos en los cultivos evaluados ni en el suelo utilizado; lo que permite sugerir el posible uso de estas aguas para la producción agropecuaria".[60]

6.2.4 Uso de Agua de Producción para Riego de Vida Silvestre y Hábitat. Se han considerado proyectos de creación de embalses que recojan y mantengan un gran volumen de agua. En algunos casos, estos pueden tener superficies de al menos varias hectáreas. Los embalses son una buena fuente de agua potable para el hábitat de la fauna silvestre y peces que viven en un entorno árido. Es importante asegurarse de que la calidad del agua embalsada no va a crear problemas de salud para la vida silvestre. Los embalses también pueden ofrecer más oportunidades de recreación para la caza, pesca y paseos en bote.

Los estanques empleados para riego en la vida silvestre proporcionan agua potable durante los períodos de sequía a diferentes clases de animales: (aves

[59] Ecopetrol. Distrito de Adecuación de Tierras Castilla, 2012.

[60] Ecopetrol. Especiales, carta petrolera 124, producción. 2011.

acuáticas migratorias, aves neo tropicales, venados, coyotes, gatos monteses, tejones y otros animales salvajes).[61]

La superficie de los embalses es susceptible a la erosión y al aumento de los sólidos disueltos totales. La superficie, área y la profundidad del embalse, dependerá del clima y las especies que lo utilicen. Por ejemplo, Para sostener una población de aves acuáticas se debe tener un área superficial de 0,4 a 4,0 hectáreas,[62] y por lo menos 25% del embalse debe tener una profundidad de 3 metros (10 pies).

Los embalses de riego de este tamaño y profundidad también podrían emplearse para sostener poblaciones de aves costeras, de tierras altas y peces. Los embalses con una superficie inferior a 0.4 hectáreas probablemente no serían capaces de soportar las poblaciones de peces.

6.2.4.1 Condiciones de calidad. El agua que se emplee para riego en la vida silvestre debe cumplir con ciertas condiciones de calidad, mencionadas a lo largo de los capítulos anteriores, con el fin de evitar que la fauna y la flora mueran a causa de un mal tratamiento de esta.

6.2.4.2 Ejemplos de las Aplicaciones de Embalses Empleados para Riego en la Vida Silvestre. Un embalse empleado para la vida silvestre es el reconocido lago Custer, está situado en la cuenca de Oregon Wyoming EE.UU. Aproximadamente 30.000 barriles de agua por día alimentan este lago estacional. Se ha visto un crecimiento masivo de fauna silvestre, como aves acuáticas y de caza.[63]

---

[61] (EE.UU. Fish and Wildlife, 2002).

[62] PROCTOR, B.R, *et al*. Practices for Protecting and and Enhancing Fish and Wildlife on Coastal Surface Mined land in The Powder River-Ft. 2006.

[63] PROCTOR, B.R, *et al*. Practices for Protecting and Enhancing Fish and Wildlife on Coastal Surface Mined land in The Powder River-Ft. 2006.

6.2.5 Construcción de Humedales. Los humedales son zonas que están parcial o completamente inundadas durante gran parte o la totalidad del tiempo, incluyen por lo general marismas, turberas y aguas someras ***(figura 41)***. Los humedales son ecosistemas complejos y sitios específicos, de extrema importancia para la supervivencia de muchas comunidades en todo el mundo. Hay dos puntos de vista enfrentados sobre la gestión de los humedales: uno agrícola y otro ecológico. Desde el punto de vista agrícola, se asume que los humedales son la base de sistemas de producción robusta, menos sensibles a la degradación debido a la entrada frecuente de agua, nutrientes y desechos orgánicos. Por otro lado, los ecologistas consideran estos mismos humedales como ecosistemas frágiles que deben ser manejados con cautela.

Figura 41. Humedal

Fuente: http://www.taiar.com.ar/UploadedImages/th3_/1/2/1247.jpg

6.2.5.1 Funciones del Humedal. Aparte de ser un gran ecosistema y un importante hábitat para muchos seres vivos, estos actúan como filtradores naturales de agua, esto se debe a que sus plantas hidrófitas, gracias a sus tejidos, almacenan y liberan agua, y de esta forma hacen un proceso de filtración. Antiguamente los humedales eran drenados por ser considerados una simple

inundación de los terrenos, pero hoy día se sabe que los humedales representan un gran ecosistema y se les valora más.[64]

6.2.5.2 Condiciones de calidad. El agua que se emplee para la construcción de humedales debe cumplir con ciertas condiciones de calidad, mencionadas a lo largo de los capítulos anteriores, con el fin de evitar que la fauna y la flora mueran a causa de un mal tratamiento de esta.

A manera de ejemplo se muestra La normatividad oficial mexicana, la cual muestra los valores admisibles de calidad del agua empleada en la creación de humedales ***(tabla 14)***. Estos valores pueden servir de referencia a la hora de querer implementar el uso de humedales en Colombia.

Tabla 14. Comportamiento de la Salinidad en los Suelos para la Construcción de Humedales.

AGUA DE SALINIDAD (CE) (DS / M)	CLASIFICACIÓN	COMENTARIOS
< 1,0	Suelos libres de sales.	No existe restricción para ningún cultivo.
1,0 - 2,0	Suelos muy bajos en sales.	Algunos cultivos muy sensibles pueden verse restringidos por su rendimiento.
2,0 – 4,0	Suelos moderadamente salinos.	Los rendimientos de los cultivos muy sensibles pueden verse afectados en su rendimiento.
4,0 – 8,0	Suelos salinos.	El rendimiento de casi todos los cultivos se ve afectado por esta condición.
8,0 – 16,0	Suelo altamente salino.	Todos los cultivos muy resistentes a la salinidad pueden crecer en estos suelos.

[64] Infoandina.org, sites, recursos, depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Pdf

> 16,0	Suelos extremadamente salinos.	Prácticamente ningún cultivo convencional puede crecer económicamente en estos suelos.

Fuente: Norma Oficial Mexicana, NOM 21, RECNAT, 2000.

6.2.5.3 Ejemplos de Aplicaciones de Agua para Irrigación de Humedales a Nivel Mundial. Los investigadores de la universidad de Clemson de Carolina del Sur, recibieron fondos para desarrollar sistemas de humedales con el agua asociada a la producción de hidrocarburos, y llevar a cabo estudios científicos para hacer frente a las preocupaciones ecológicas, ambientales y normativas que limitan las opciones para la gestión de agua de producción, incluidas las aguas superficiales de descarga. El proyecto, junto con Chevron, opera los pozos de petróleo y gas en Omán. Después de un estudio piloto de la utilización de humedales artificiales para el tratamiento de agua de producción dando resultados favorables, se ha embarcado en un proyecto de gran tamaño utilizado para el tratamiento de al menos 280.000 barriles / día de agua de producción.[65]

En el campo Santiago en asociación de Petrobras-Ecopetrol, se realiza irrigación de agua de producción a un cultivo de arroz dando resultados favorables, actualmente, Ecopetrol busca expandir estas zonas para producir más arroz a partir de los humedales artificiales creados.[66]

6.3 IMPLEMENTACION EN CAMPOS COLOMBIANOS

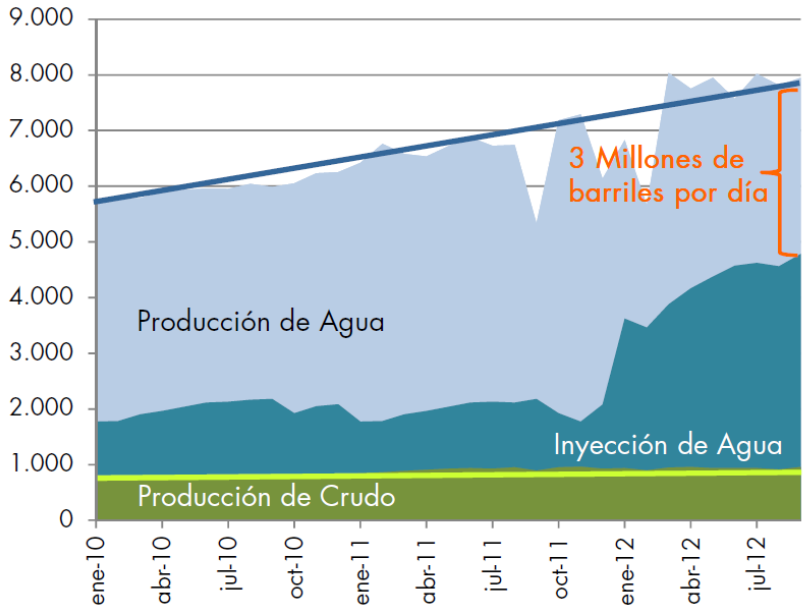
Muchos campos colombianos tienen grandes cortes de agua y esto genera una problemática, tanto económica para las empresas que extraen los hidrocarburos y ambiental para las personas, flora y fauna de la región donde se está llevando a cabo la extracción; en algunos casos debido a las practicas ineficientes que la

[65] Consultoría para la Protección de Aguas Subterráneas, Fundación para la Investigación, EE.UU. Departamento de Energía. Handbook on Coal Bed Methane Produced Water: Management and Beneficial Use Alternatives, 2003.

[66] Ecopetrol. Distrito de Adecuación de Tierras Castilla, 2012.

industria implementa, para disminuir los costos que generan los tratamientos del agua, en otros casos, por las enormes cantidades que se derraman a los diferentes ecosistemas y traen consigo cambios irreversibles al medio ambiente.[67]

Figura 42. Producción de agua en Colombia



Fuente: Minminas – ANH, 2014 / Acipet, 2013

Este importante recurso que es el agua, podría aprovecharse de diferentes maneras, y una de estas, es la que se propone en este libro, primero tratándose apropiadamente y posteriormente reinyectándose en acuíferos para su almacenamiento y su posterior uso, cuando la situación lo requiera, ya sea por problemas de sequias ocasionas por diferentes fenómenos climáticos, o el aprovechamiento de este recurso para uso industrial.

En Colombia existen regiones como el Valle del Cauca y el Urabá Antioqueño donde el agua para riego depende casi que exclusivamente de las aguas

[67] Modificado de: Taller "Aspectos Generales sobre los Pozos Inyectores en la Exploración y Producción de Hidrocarburos", Agencia Nacional de Hidrocarburos – ANH junio de 2014.

subterráneas. En la primera de las regiones antes mencionadas, se bombean anualmente 1200 x 10^6 m³, que representan solo el 40% del potencial total de los acuíferos lo que da una idea de la magnitud del recurso de esa zona.

En Urabá la explotación del banano (segundo renglón agrícola de exportación de Colombia actualmente) depende en gran parte de los recursos de agua subterránea de esa zona. En 1993 el volumen diario de explotación de agua subterránea en Urabá era de unos 58000 m³, de los cuales el 65% se usaba en la agricultura y el resto en la industrial y abastecimiento público.[68]

En el norte del país, principalmente en los departamentos de Guajira y Sucre, casi que el agua subterránea es la única fuente de abastecimiento de agua, para consumo humano. En Sucre el 91.7% del área urbana se abastece de fuentes subterráneas, captadas a través de pozos profundos. En promedio se extraen 217.7 L/hab/día[69] una práctica de sobre explotación de este acuífero.

La región del norte de Colombia donde se utiliza el agua subterránea en mayor porcentaje para regadío y ganadería es la que corresponde a los valles del río Cesar y Arigua.[70]

Sin embargo, todavía en Colombia no está muy desarrollada la explotación racional de los recursos en aguas subterráneas. En los últimos años una serie de entidades, tanto a nivel regional como de todo el país, han impulsado ciertos programas tendientes a conseguir dicho objetivo. Entre las principales puede mencionarse la CVC en el Valle del Cauca, e INGEOMINAS con estudios de evolución de este recurso en regiones tales como la Guajira.

---

[68] (INGEOMINAS, 1993).

[69] DONADO GARZÓN, Leonardo David, et al, Modelo hidrológico conceptual de la zona de recarga del acuífero Morroa, (Departamentos del Sucre y Córdoba), pág. 2. 2002.

[70] VÉLEZ OTÁLVARO, María Victoria, Hidráulica de aguas subterráneas, 2ª edición, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, pág. 4, 1999.

Las aguas subterráneas en Colombia jugarán en el futuro un papel de enorme importancia, bien sea como una alternativa tecnológica para la explotación del recurso, en áreas donde su costo pueda competir con la utilización de agua superficial, o como única alternativa disponible en regiones donde el balance demanda-disponibilidad presente situaciones críticas.

6.4 CAMPOS COLOMBIANOS[71]

Estos son algunos campos colombianos que, por su gran producción de agua, agua de baja salinidad y acuíferos activos, presentan una buena alternativa a la hora de desarrollar el proyecto.

6.4.1 Campo Castilla.

6.4.1.1 Reseña histórica. El pozo Castilla 1 fue perforado por Chevron en 1969 y alcanzo una profundidad de 7347 pies; probo crudo pesado en las formaciones Mirador (10°API) Guadalupe y Une (13 7°API) El campo Castilla produce de las areniscas de Une y Gacheta. También fue probada la Fm. Mirador como productora de crudo pesado. Esta formación no ha sido explotada comercialmente y se tiene como reserva para ser completada una vez se agoten las reservas de las formaciones Une y Gacheta. El área productiva máxima calculada por Ecopetrol es de 11000 acres.

6.4.1.2 Geología. La estructura es un anticlinal asimétrico elongado con una orientación N60E, de aproximadamente 10 km de largo por 4 de ancho. Fallado en el flanco oriental. Contiene fallas internas normales e inversas. Al parecer estas fallas no son sellantes, ya que el contacto agua-petróleo no muestra cambios significativos a lado y lado de estas. La trampa es estructural.

---

[71] CUENCA LLANOS ORIENTALES; ESTUDIO INTEGRADO – CRUDOS PESADOS, ANH Agencia Nacional de Hidrocarburos, Colombia. 2005.

6.4.1.3 Producción. El campo inicio producción en 1976. La curva histórica de producción muestra tendencia a aumentar hasta la fecha. En marzo de 2017 se reportó una producción diaria de 110.407 BPD con un corte de agua de 63%. El mecanismo de producción para las formaciones Une y Gacheta es un acuífero activo.

6.4.1.4 Reservas. El promedio usado para el estimado de las reservas remanentes fue 15% anual, promedio de la declinación calculado. Se usó una tasa de abandono de 500 barriles para todo el campo. Las reservas probadas desarrolladas remanentes para las formaciones Une y Gacheta son de 101 MMBls.

6.4.2 Campo Chichimene

6.4.2.1 Reseña histórica. El pozo Chichimene – 1 fue perforado por Chevron en 1969 hasta una profundidad de 9300 pies. El pozo Chichimene – 1 probó crudo pesado en las formaciones Mirador (Guadalupe para éste estudio) (9.6°API) y Guadalupe (16°API). Chichimene – 3 probo crudo pesado en las formaciones C8 (9.6°API) y Mirador (Guadalupe para este estudio) (8.7APIº). La producción del campo proviene de las formaciones Gacheta y Une con crudo de 20°API. El campo tiene unas dimensiones de 13 x 3.5 km.

6.4.2.2 Geología. Estructuralmente Chichimene corresponde a un anticlinal alargado con dirección N60E de 6km de longitud y 2.5 de ancho, su flanco oriental se encuentra fallado.

6.4.2.3 Producción. El campo Chichimene empezó a producir en 1985 con una producción constante de 500 barriles/día hasta mediados de 1989. La producción se incrementó a 2000 barriles/día a mediados de 1989. Se incrementó

nuevamente a mediados de 1994 a 10500 barriles/día. En 1998 llegó a 12000 barriles. La producción declino y a mediados de 2003 llego a 5000 barriles/día. En 2004 – 2005 la producción incremento, debido posiblemente a la perforación de nuevos pozos y/o reacondicionamientos. A marzo de 2017 la producción fue de 61.190 BPD con un corte de agua de 89%. El mecanismo de producción en Une y Gacheta es empuje activo de agua.

6.4.3 Campo Entrerrios.

6.4.3.1 Reseña histórica. El pozo Entrerrios – 1 fue perforado por Ecopetrol entre abril y mayo de 1984. Alcanzo una profundidad de 10761 pies. Probó crudo pesado en las formaciones Mirador (16.80°API), Guadalupe (17°API) y Une (17 20°API) La unidad productora del campo son las areniscas inferiores del Mirador; entre 8982 y 8990 pies. De acuerdo a las formas del ministerio el pozo Entrerrios - 2 presenta crudo pesado de 14.5º en la unidad Une, su producción es de 454 BOPD, 2157 BWPD y 82.6 % BSW.

6.4.3.2 Geología. Estructuralmente el campo Entrerrios es un anticlinal de rumbo 45º NE, truncado en su parte oriental por una falla normal buzando hacia el SE.

6.4.3.3 Producción. En Abril de 2004 se inició la producción con 850 barriles/día. Febrero de 2005 declino a 300 barriles. Incremento en Junio de 2005 a 750 barriles/día. Para Diciembre de 2005 la tasa de producción fue de 683 barriles/día con un corte de agua de 97%. A marzo de 2017 la producción fue de 714 BPD. El mecanismo de producción es por empuje activo de agua.

6.4.4 Campo La Gloria Norte.

6.4.4.1 Reseña histórica. El pozo La Gloria Norte – 1 fue perforado por ELF en 1983 hasta una profundidad de 14350 pies. Mostró crudo pesado en Mirador y Une (16.5°API).

6.4.4.2 Geología. La estructura del campo corresponde a un anticlinal controlado hacia el Este por una falla antitética de rumbo SN; al sur por una falla normal y al W por el contacto agua-petróleo localizado a -12194 pies.

6.4.4.3 Producción. La producción del campo se inició en 1984 con La Gloria Norte - 1; en 1989 y 1990 empezaron a producir los pozos La Gloria Norte -3 y 4 . En 1996 inicio producción el pozo La Gloria Norte – 5. El pozo La Gloria Norte – 2 fue clasificado como seco. La producción proviene de Mirador superior e inferior. En marzo de 2017 la tasa de producción fue de 750 barriles por día con un porcentaje de agua del 95%. El mecanismo de producción predominante es un mediano empuje de agua con expansión de fluidos.

6.4.5 Campo Rubiales.

6.4.5.1 Reseña histórica. El pozo Rubiales – 1 fue perforado por la compañía Intercol en 1981 y alcanzo una profundidad de 3000 pies. Probó petróleo de 13.5° API en las areniscas basales de Carbonera. El pozo Rubiales – 4, operado por Tuskar, alcanzo una profundidad de 3140 pies y probo crudo pesado (14°API) en C7. La producción proviene de la unidad C7 de Carbonera.

6.4.5.2 Geología. La estructura del campo Rubiales está constituida por un monoclinal orientado regionalmente en una dirección N50ºE. De acuerdo a los reportes bibliográficos, el entrampamiento de hidrocarburo en el campo Rubiales se da gracias a una combinación de factores estratigráficos e hidrodinámicos (Empuje de agua fresca que genera un contacto agua-aceite inclinado 0.35° al NW). Sin embargo existen diferencias al establecer cuál de los dos factores es el principal limitante de la acumulación de hidrocarburo.

6.4.5.3 Producción. La historia de producción del campo Rubiales incluye los pozos de la Asociación Pirito. La producción inicio en 1992. Se cerró en 1997 y comenzó de nuevo en el 2001 a una tasa promedio de 1700 barriles de

petróleo/día con tendencia a subir, debido a la campaña de perforación de nuevos pozos. A marzo de 2017 la producción del campo fue de 117.572 BPD con un corte de agua del 80% al 87%. El mecanismo de producción es empuje hidrodinámico de agua.

6.4.6 Campo Santiago.

6.4.6.1 Reseña histórica. La perforación de Santiago Este – 1(Pozo descubridor) fue realizada por Lasmo en 1988. Este llego a una profundidad de 10220 pies y probó 1396 BOPD de 21.9°API en la Formación Mirador. El pozo Santiago Este – 2 llegó a una profundidad de 10.150 pies con O/W a -8.760. Actualmente hay tres pozos perforados y el campo es operado por Petrobras.

6.4.6.1 Geología. La estructura está conformada por un anticlinal de dirección NE En su flanco oriental tiene una falla con pendiente SE. El paleoambiente de depósito es fluvial de canales meandriformes.

6.4.6.2 Producción. En diciembre de 2005 la producción total del área Santiago fue de 3855 barriles diarios de petróleo con un 98% de agua. Se identificaron los campos Santiago Norte, Santiago Este y El Palmar como productores de crudo pesado. El campo Santiago Norte cuenta con un promedio de producción a marzo de 2017 de 833 BPD de petróleo con un corte de agua del 98%.

7. CONCLUSIONES

- En esta tesis se ha considerado la solución al problema de la escasez y la contaminación los de recursos hídricos, en base a esto y con relación a la información recopilada y analizada es evidente que las aguas resultantes de los procesos en la extracción de hidrocarburos generan un gran daño ambiental, por esta razón conocer y analizar cada una de las propiedades del agua debe ser una prioridad para convertir este problema en una fuente de soluciones.
- La reinyección y el almacenamiento en un acuífero dependen en gran forma de la calidad del agua, debido a que si esta se inyecta con una baja calidad, tiende a taponar la cara del pozo inyector y a causar daños a las facilidades de superficie y subsuelo, causando grandes pérdidas económicas, por lo que el monitoreo y el mantenimiento de la infraestructura aumentara, asociado a las condiciones físicas que presenta la roca ya que esta deberá tener la suficiente permeabilidad para el buen funcionamiento del proyecto.
- De acuerdo a la información recopilada de los acuíferos y sus características, el agua, debido a su infiltración atreves de la roca o inyección como es el caso de nuestro proyecto, sufre cambios químicos que en ocasiones son favorables o no, dependiendo de las características físico-químicas de las roca, debido a esto no se puede determinar con exactitud cuáles serán las características finales del agua, a la hora de ser reutilizada y esto solo se puede determinar al realizar un proyecto piloto.
- La normatividad ambiental es cada día más exigente y el compromiso que tiene la industria petrolera de conservar la naturaleza es cada vez mayor, por consiguiente tanto científicos como fabricantes de esta industria se han dado a la tarea de desarrollar tecnologías que día a día sean más amables con el medio ambiente; por esta razón es importante promover una cultura en donde la explotación de recursos naturales sea consecuente con el

desarrollo y la tecnificación de la industria, y así evitar el impacto ambiental progresivo.

- Con este proyecto se lleva al lector, a las empresas, a las entidades gubernamentales y demás entidades involucradas en el sector de los hidrocarburos, a implementar como posible solución este tipo de proyectos en sus procesos, dejando en claro que este proyecto deja planteado un procedimiento el cual puede ser modificado dependiendo de las características del agua de producción y la zona donde se valla a inyectar y almacenar.

8. RECOMENDACIONES

- Se recomienda diseñar y desarrollar un software capaz de almacenar y procesar toda la información de la reinyección y almacenamiento del agua, que maneje los comportamientos de la misma en el acuífero y los resultados de herramientas de monitoreo y técnicas de seguimiento, para posteriormente evaluar el proceso e identificar los tratamientos de control necesarios; todo esto con el fin de realizar un análisis integral a los procesos de monitoreo, seguimiento y control implementados en el proyecto.
- Una pobre calidad en el agua de inyección tiende a generar costos, y a verse comprometida la viabilidad del proyecto; por esta razón, se recomienda controlar la calidad del agua desde el momento en el que se extraen los fluidos del yacimiento y mantener este control durante todo el proceso de inyección.
- Para el diseño y aplicación de una reinyección y almacenamiento de agua, se recomienda realizar un estudio económico, social y ambiental que permita establecer los alcances, la cantidad de agua, de pozos y la periodicidad apropiada para su implementación, de acuerdo a las especificaciones económicas y a los requerimientos del proceso, tomando en cuenta siempre, las características propias del acuífero o formación a utilizar.

BIBLIOGRAFÍA

- ACUÑA BARRANTES, Ana Julia, Evaluación de la calidad del agua residual regenerada para la recarga artificial de acuíferos, Barcelona, junio 2017.
- AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS – ANH, Taller "Aspectos Generales sobre los Pozos Inyectores en la Exploración y Producción de Hidrocarburos", junio de 2014.
- AMERICAN INSTITUTE OF PARAFFIN, Asphaltene and Scale, A Technology and Research Center 301 constitution, Lafayette, Louisiana 70503-USA, "Sistemas de reinyeccion de agua de formación y equipos de superficie para tratamiento de aguas". Nov 2013.
- ARNOLD, Ken y STEWART, Maurice. Surface Production Operations. Design of Oil -Handling Systems and Facilities. Primera Edición. 1999.
- ARNOLD, Richard, et al, Manejo de la producción de agua: De residuo a recurso. Schlumberger. Otoño 2004.
- ARPEL, Guía Ambiental No. 1, Guía Para La Disposición Y El Tratamiento De Agua Producida, Javier de viana 2345 CP 11200 Montevideo Uruguay. 2001.
- AYERS, R.S, and D.W. WESTCOT, Water Quality for Agriculture, 2003.
- BASSIOUNI Z. Theory, measurement, and interpretation of well logs. 1994.
- BENNION, D.B.; BENNION, D.W. y BIETZ, R. F. Injection Water Quality– A Key Factor to Successful Waterflooding. JCPT. 1998.
- BILL BLACK, et al. El manejo de un recurso precioso. Vancouver, Columbia Británica, Canadá. 2008.
- BLANCO SIMBAQUEBA, Johanna y DELGADILLO AYA, Claudia Lorena, Metodología integrada para el diseño de un monitoreo de inyección de agua

desarrollado en un campo petrolero, Universidad Industrial de Santander, Facultad de ingenierías fisicoquímicas, Escuela de ingeniería de petróleos, Bucaramanga, 2006.

- BONAPACE, J. and GIGLIO, M. Water Conservation: Reducing Fresh Water Consumption by Using Produced Water for Base Fluid in Hydraulic Fracturing- Case Histories in Argentina. SPE 151819, 2012.
- CANARIAS ACEBIÑO, Biocidas, boletín informativo tomo núm. 18 – 3° Trim. 2011.
- CASE PENNWEL, L. C, Water Problems in Oil Production, 1970.
- CASTELLANOS OBREGÓN, Rafael y GONZÁLEZ DONIS, Virginia. Dirección General de Planificación Energética. Prospectiva del Sector Eléctrico 2006-2015, 2006.
- CASTRO CASTELL, Martha Rocío. Estado del Arte de Sistemas de Tratamiento de Aguas de Producción en Campos Petroleros, 2004.
- CHEN, E. Y. y CHEN, R. B. Monitoring Microbial Corrosion in Large Oilfield Water Systems. SPE 11509, 1984.
- COBB, W. M. & SMITH, J. T. An Investigation of Pressure Buildup Test in Bounded Reservoirs. SPE 5133, 1974.
- COLLAZO, María Paula y MONTAÑO Jorge. Manual de agua subterránea. Montevideo: Ministerio de ganadería, agricultura y pesca. 121 p. 2012.
- CUENCA LLANOS ORIENTALES; ESTUDIO INTEGRADO – CRUDOS PESADOS, ANH Agencia Nacional de Hidrocarburos, Colombia. 2005.
- DAL FERRO, Benoit y SMITH, Michael. Global offshore and offshore water production. Douglas-Westwood Ltd. 4 Sept 2009.
- ECOPETROL S.A, Distrito de Adecuación de Tierras Castilla, 2012.

- ECOPETROL S.A, Especiales, carta petrolera 127, Producción. sep. - dic. 2011.
- ECOPETROL S.A, Taller de pozos de inyección, generalidades sobre pozos inyectores. Feb 09, 2016.
- ECOPETROL S.A. Estrategia Ambiental 2012 – 2020, Enfoque biodiversidad, mayo de 2014.
- EE.UU, DEPARTAMENTO DE ENERGÍA, Consultoría para la Protección de Aguas Subterráneas, Fundación para la Investigación, Handbook on Coal Bed Methane Produced Water: Management and Beneficial Use Alternatives, 2003.
- EE.UU, ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, Standards and Enforcement for Air and Water Pollution Control, Washington, DC, 20460. March 1973.
- EL TIEMPO, Siete de cada diez municipios no tratan sus aguas residuales, Vida – Medio ambiente, 22 de marzo de 2017.
- ESPIGARES GARCÍA, M. y PÉREZ LÓPEZ J. A, Aguas residuales, Composición, septiembre de 2003.
- FALLA VILLEGAS, ELIAS JHON, Universidad Mayor Nacional de San Marcos, Monografia para optar por el título de Licenciado en Física, Interpretación de registros de pozos de petróleo. Lima, Perú. 2005.
- FERNÁNDEZ ESCALANTE, Enrique y SÁNCHEZ, Rosa, Exposiciones la educación ambiental aplicada a la recarga artificial de acuíferos. Copilco, México, D.F. 2006.
- FORERO, Jorge Enrique, ORTIZ, Olga Patricia y RIOS, Fabián, Aplicación de procesos de oxidación avanzada como tratamiento de fenol en aguas residuales industriales de refinería, Ecopetrol S.A. - ICP Instituto

Colombiano del Petróleo, A.A. 4185 Bucaramanga, Santander, Colombia, 2005.

- FUENTES, Jose Luis. Aguas Subterráneas. Madrid: Ministerio de agricultura, pesca y alimentación, 1992.
- GOMEZ ANGELES, Rolando Lucio, Tesis: "Tratamiento y disposición final de aguas de producción en el nor-oeste peruano", para optar el título profesional de: Ingeniero de Petróleo, Universidad Nacional De Ingeniería Facultad De Ingeniería De Petróleo, Gas Natural Y Petroquímica, 2011.
- GUTIÉRREZ OJEDA, Carlos, Recarga artificial de acuíferos (Managed Aquifer Recharge), mayo 2016.
- HOLLIDAY, George. A Need for Converting Produced Waters to Useable Waters. SPE 105094, 2007.
- HUTSON, S.S, *et al*. Estimated Use of Water in the United States in 2000, 2004.
- J. D, Arthur, and B. J, Coughlin, Cumulative Impacts of Shale- Gas Water Management: Considerations and Challenges. SPE 142234, 2011.
- J. Quintana y J. Tovar, Evaluación del acuífero de Lima (Perú) y medidas correctoras para contrarrestar la sobreexplotación. Lima, Perú. 2002
- J.A. de la Orden, J.A. López-Geta y J.M. Murillo, Experiencias de recarga artificial de acuíferos realizadas por el IGME en acuíferos detríticos, (Madrid) España. 2003
- JAIMES, Jose David. Métodos geofísicos aplicados a la caracterización de suelos: estado del arte. Trabajo de grado (ingeniería civil). Universidad Industrial de Santander. Facultad de físico-mecánicas. Escuela de ingeniería civil. Bucaramanga. 2011.
- K, Simms, S Kok, A, Zaidi, Alternative Processes for the Removal of Oil from Oilfield Brines, Environment Canada, Wastewater Technology Centre,

Burlington, New Orleans, Louisiana, Sponsored by U.S. EPA. Ontario September 10-13, 1990.

- KAMAL, M. Interference and Pulse Testing – A Review. SPE 10042, 1983.
- KIRK, Joseph W. A Review of Waterflood Filtration. SPE 850.
- KOKAL, Sunil. Crude oil emulsions: A state of art review, Saudi Aranco. SPE Paper 77497. 2002.
- LANDAZÁBAL PINZÓN, Gustavo A., INFANTE MORENO, Marlon R. Definición de Estándares Operacionales para el Tratamiento de Aguas Residuales, 2007.
- LAVARIEGA PULIDO, Lourdes, Trenes de Tratamiento para Agua de la Industria Petrolera, División Académica de Ciencias Biológicas, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco Villahermosa, Tabasco, México, 2011.
- LEE, John. Well Testing. Society of Petroleum Engineers of AIME, 1982.
- LIMA – PERÚ, Cartilla Técnica "Contribuyendo al desarrollo de una Cultura del Agua y la Gestión Integral de Recurso Hídrico", 2011
- LODDE, Eric, Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), Estrategias para la Gestión de Recarga de Acuíferos (GRA) en Zonas Semiáridas, 2005.
- LONDOÑO PÉREZ, Rubén Darío y PARRA MARTÍNEZ, Yanneth, Manejo de vertimientos y desechos en Colombia, Una visión general Revista Épsilon Nº 9: 89-104 / Julio - diciembre 2007.
- MAGAZINE OILFIELD REVIEW - SCHLUMBERGER. Manejo de la producción de agua: de residuo a recurso. Spring 2000.
- MANCILLA ESTUPIÑAN, Robinson Andres y MESA NAUSA, Henry Oswaldo, Metodología para el manejo de aguas de producción en un campo petrolero, Universidad Industrial de Santander, facultad de

ingenieras físico-químicas, escuela de Ingeniería de Petróleos, Bucaramanga, 2012.

- MANCILLA ESTUPIÑAN, Robinson Andres y MESA NAUSA, Henry Oswaldo, Metodología para el manejo de aguas de producción en un campo petrolero, Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenieras Físico-Químicas, Escuela de Ingeniería de Petróleos Bucaramanga 2012.
- MENDOZA ARCHUNDIA, Efraín, Caracterización hidrogeológica de la porción sureste de la planicie de Texcoco, México, para establecer sitos de recarga artificial al acuífero. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, México, D.F. octubre, 2012.
- MEXICO D.F, Norma Oficial Mexicana NOM 21, RECNAT. 2000.
- MEXICO D.F, UNIVERSIDAD AUTONOMA DE MEXICO, Doctos, Fundamentos FRX. 2009. Pdf.
- MUN C, Johnathan. Perfil Energético de América del Norte. 2006.
- MUÑOZ CRUZ, Amílcar, "Caracterización y tratamiento de aguas residuales", Monografía para obtener el título de ingeniero industrial, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Instituto de ciencias básicas e ingeniería, Licenciatura en ingeniería industrial, México, junio de 2008.
- MURPHREE, P.A. Utilization of Water Produced from Coal Bed Methane Operations at the North Antelope/Rochelle Complex, Campbell County, Wyoming. 2002.
- NIÑO FLÓREZ, Fredy Omar y GÓMEZ, Jaime F. Ecopetrol S.A, Equion, Taller de pozos de inyección, Generalidades sobre pozos disposal. 2016.
- ORDOÑEZ, Galvez. Ciclo hidrogeológico. Lima: Sociedad Geografica de Lima, 2011. ISBN: 978-9972-602-77-1.

- ORTIZ VALBUENA, Marcela, Tesis: Manejo ambiental de la disposición final de los fluidos base utilizados en la perforación de algunos pozos petroleros en Colombia, Fundación Universidad de América, Facultad de Educación Permanente y Avanzada, Especialización en gestión ambiental, Bogotá D.C, 2016.
- PARIS DE FERRER, Magdalena. Inyección de Agua y Gas en Yacimientos Petrolíferos. Astro Data S. A. Segunda Edición. 2001.
- PATTON, Charles C. Water Quality Control and Its Importance in Waterflooding Operations. SPE 18459, September 1988.
- PATTON. Charles C. Oilfield Water Systems. Oklahoma. 1981.
- PINEDA J, NUNCIRA S. Análisis de zonas fracturadas mediante el uso de registros eléctricos, para la Formación Mirador, en un campo del Piedemonte Llanero Colombiano. Tesis para optar por el título de Ingeniero de Petróleos. Universidad Industrial de Santander UIS. Facultad de Ingeniera Fisco-Químicas, 2005.
- PLADEYRA, SC; ESCOLERO Oscar; DOMINGUEZ Eloisa y MARTINEZ Sandra. Ciclo hidrogeológico. En: Atlas de la cuenca Lerma-Chapala. México, 2006.
- PRESENTED AT THE FIRST INTERNATIONAL CONFERENCE ON HEALTH, Safety and Environment held in The Hague, Netherlands, 10 -14 November 1991.
- PROCTOR, B.R, *et al*. Practices for Protecting and and Enhancing Fish and Wildlife on Coastal Surface Mined land in The Powder River-Ft. 2006.
- R.S, Ayers and D.W. Westcot, Water Quality for Agriculture, 2003.
- R.S, Ayers. Calidad del agua para la agricultura, de la Universidad de California en Davis, California, EE.UU. 2002.

- RAMÍREZ CAMPEROS, Esperanza, *et al,* Tratamiento de aguas de la desalación del petróleo para su aprovechamiento en inyección al subsuelo, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2006.
- REPUBLICA DE COLOMBIA, Ministerio De Ambiente Y Desarrollo Sostenible, Resolución 631 de 2015.
- REPÚBLICA DE COLOMBIA, Ministerio de Salud. Decreto 1594 de 1984.
- REPÚBLICA DE COLOMBIA, Ministerio de Salud. Decreto 475 de 1998.
- RUSELL, J. W. Plastic Coating for Corrosion Control in Petro and Production Industry. SPE 7771, 1979.
- SILIN, D. B. Monitoring Waterflood Operations: Hall´s Method Revisited. SPE. 93879, 2005.
- SIMS, John J. and PUCKORIUS, Pul R. A Practical Guide to Water Recycle-Reuse. Paper 484, 1995.
- STEPHEN C. Rose. The Design Engineering Aspects of Waterflooding. SPE. 1989.
- STEVENSON, MT, Components of Produced Water: A Compilation of Results from Several Industrial Studies, Texaco Inc., SPE Paper 23313. Presented at the First International Conference on Health, Safety and Environment held in The Hague, Netherlands, 10 -14 November 1991.
- TALASH, A.W. "An Overview of Waterflood Surveillance and Monitoring," Journal of Petroleum Technology, 1988.
- THAKUR, Ganesh y SATTER, Abdus, Integrated Waterflood Asset Management. 1998.
- TUESTA, Erika Gabriel y HUAYPAR VÁSQUEZ, Yezeña. Aplicación de la técnica de difracción de rayos x (drx) en la industria minera, Laboratorio de Caracterización Mineralógica Buenaventura Ingenieros - BISA. 2012.

- UNIVERSIDAD DE LOS ANDES, Paper Tratamiento Deshidratación de Crudo Parte 2, Lab. Formulación, Interfaces, Reología y Procesos. 2015.
- UNIVERSIDAD DE SALAMANCA. Conceptos fundamentales de hidrogeología. 2014. Pdf
- VALDEZ, Edgar. Registro de pozos. 2013.
- VEIL, J.A, M.G. PUDER, D. ELCOCK, y R.J. REDWEIK, Jr, A White Paper Describing Produced Water from Production of Crude Oil, Natural Gas, and Coal Bed Methane, 2007.
- VÉLEZ OTÁLVARO, María Victoria, Hidráulica de aguas subterráneas 2ª edición, Profesora Asociada, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, 1999.
- WERNER, Joerg. Introducción a la hidrogeología. México D.F: Universidad Autónoma de Nuevo León, 1996.