



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Análisis de factibilidad para el uso y aprovechamiento de aguas residuales asociadas a la extracción de hidrocarburos como riego de plantas no comestibles

TESIS

Para obtener el título de
Ingeniero Petrolero

P R E S E N T A

Roberto Jordan Lira Islas

DIRECTORA DE TESIS

Dra. Silvia María Chávez Morales



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Armando y Rocio, quienes, con sus consejos, enseñanzas, esfuerzos sacrificios, amor y cuidados me dieron las herramientas para construir este largo camino.

A mis hermanos, Yuridia, Ivet y Armando, ejemplo de vida para mí, sin su apoyo incondicional, esta aventura hubiera sido imposible.

A mi compañera de vida, que, con su amor y comprensión, hizo que en este trayecto siempre me sintiera acompañado.

A mi directora de tesis, que, sin sus conocimientos y tiempo invertido, este trabajo no hubiera sido posible.

A mis maestros, que, a lo largo de toda mi carrera universitaria, me brindaron sus conocimientos para mi formación integral como ingeniero.

A mis amigos dentro y fuera de la universidad, que complementaron mi formación universitaria y personal.

A mi universidad y alma mater, que, sin sus espacios académicos, culturales y recreativos no podría tener el título de ingeniero petrolero.

A todos ellos muchas gracias.

INDICE

Introducción	1
Capítulo 1. Conceptos básicos	2
1.1. Porosidad (ϕ)	2
1.1.1. Porosidad primaria.....	3
1.1.2. Porosidad secundaria	3
1.1.3. Porosidad absoluta (ϕ_a)	3
1.1.4. Porosidad efectiva (ϕ_e).....	4
1.2. Permeabilidad (k)	4
1.2.1. Permeabilidad absoluta (k_a).....	5
1.2.2. Permeabilidad efectiva (k_e)	6
1.2.3. Permeabilidad relativa (k_r).....	6
1.3. Saturación (S)	7
1.3.1. Saturación inicial.....	9
1.3.2. Saturación crítica	9
1.3.3. Saturación residual.....	9
1.3.4. Saturación de agua irreducible	9
1.4. Viscosidad (μ)	10
1.5. Mojabilidad (θ)	10
1.6. Tensión interfacial (σ)	11
1.7. Presión capilar (P_c)	11
1.8. Densidad (ρ)	12
1.8.1. Densidad relativa (γ)	13
Capítulo 2. Agua asociada a la producción	15
2.1. Agua de formación	15
2.1.1. Tipo de agua de formación.....	16
2.1.2. Composición de las aguas de yacimiento.....	17
2.1.3. Origen de las aguas subterráneas	19
2.2. Aguas congénitas	20

2.2.1.	Clasificación del agua producida según su origen	20
2.2.2.	Propiedades de las aguas congénitas	21
2.3.	Instalaciones de superficie	27
2.3.1.	Métodos de separación del agua	30
2.3.1.1.	Separadores	30
2.3.1.2.	Tratadores.....	32
2.3.2.	Separación de contaminantes	34
2.4.	Métodos empleados para el desecho o reutilización del agua en la industria petrolera.....	38
Capítulo 3. Organismos y normas reguladoras para el uso y tratamiento de aguas residuales		
		41
3.1.	Antecedentes	41
3.2.	Organismos reguladores del agua en México	43
3.2.1.	SEMARNAT	43
3.2.2.	CONAGUA.....	44
3.2.3.	PROFEPA.....	44
3.2.4.	ASEA	45
3.3.	Leyes y normas reguladoras para aguas residuales	46
3.3.1.	Ley General de Equilibrio Ecológico.....	46
3.3.2.	Ley de Aguas Nacionales.....	49
3.3.3.	NOM-001-SEMARNAT-1996	50
3.3.4.	NOM-143-SEMARNAT-2003	52
Capítulo 4. Tratamientos disponibles para la reducción de contaminantes en el agua para la factibilidad de su aprovechamiento		
		55
4.1.	Pretratamientos y tratamientos primarios	56
4.1.1.	Cribado o mallas	57
4.1.2.	Sedimentación.....	58
4.1.3.	Flotación.....	60
4.1.4.	Neutralización.....	62
4.1.5.	Homogeneización	63
4.2.	Tratamientos secundarios	63

4.2.1.	Tratamiento de lodos activados.....	64
4.2.2.	Sistema filtro precolador	66
4.2.3.	Sistemas de biodiscos	67
4.2.4.	Sistema biológico de membranas.....	68
4.2.5.	Biomedia	69
4.2.7.	Clarificador secundario	70
4.3.	Tratamiento terciario	71
4.3.1.	Filtración.....	71
4.3.2.	Adsorción en carbono activo.....	74
4.3.3.	Coagulación- Floculación	76
4.3.4.	Intercambio iónico.....	76
4.3.5.	Microfiltración, Ultrafiltración y Nanofiltración	77
4.3.6.	Ósmosis inversa	78
4.3.7.	Electrodialisis.....	80
4.3.8.	Desinfección	81
Capítulo 5. Análisis composicional del agua de producción de un campo petrolero en México y problemática para la utilización.....		83
5.1.	Descripción de la muestra.	84
5.2.	Problemas presentes en la planta provocados por altos niveles de salinidad.	86
5.2.1.	Salinidad total.....	86
5.2.2.	Problemas de sodio.....	87
5.2.3.	Problemas de bicarbonatos	88
5.3.	Caso de estudio	89
Capítulo 6. Factibilidad para el uso del agua en México		102
6.1.	Sequía en México	102
6.2.	Localización de especies tolerantes a la salinidad en México.....	104
6.3.	Arreglo de una planta tratadora.....	107
6.3.1.	Tratamiento primario propuesto	107
6.3.2.	Tratamiento secundario propuesto	108
6.3.3.	Tratamiento terciario propuesto.....	108
Conclusiones.....		111

Recomendaciones	112
Referencias bibliográficas	113

INDICE DE IMAGENES

Figura 1. Porosidad de la roca (Fuente: Recapitulación técnica, Halliburton).	2
Figura 2. Curva de permeabilidad relativa (Fuente: Recapitulación técnica, Halliburton).	7
Figura 3. Distribución de los fluidos en los poros.....	8
Figura 4. Ejemplo de mojabilidad (Fuente: Recapitulación técnica, Halliburton).	11
Figura 5. Distribución de los fluidos en el yacimiento (Fuente: SPE Oilfield Review, 2010).	15
Figura 6. Ciclo de inyección del agua (Fuente: SPE Oilfield Review, 2015).	16
Figura 7. Producción de agua en el tiempo (Fuente: SPE Oilfield Review, 2010)	21
Figura 8. Instalaciones de superficie típicas (Fuente: SPE Oilfield Review, 2010)	28
Figura 9. Separador de fondo (Fuente: SPE Oilfield Review, 2010)	29
Figura 10. Equipo de limpieza manual (Fuente: Operación y Mantenimiento de Plantas de Tratamiento de Aguas, CONAGUA).	57
Figura 11. Equipo de limpieza automático (Fuente: Operación y Mantenimiento de Plantas de Tratamiento de Aguas, CONAGUA).	58
Figura 12. Sedimentador primario rectangular (Fuente: Operación y Mantenimiento de Plantas de Tratamiento de Aguas, CONAGUA).	59
Figura 13. Ubicación de los sedimentadores en un diagrama de proceso (Fuente: Operación y Mantenimiento de Plantas de Tratamiento de Aguas, CONAGUA).	60
Figura 14. Sistema de flotación en funcionamiento (Fuente: Operación y Mantenimiento de Plantas de Tratamiento de Aguas, CONAGUA).	61
Figura 15. Sistema de flotación (Fuente: Operación y Mantenimiento de Plantas de Tratamiento de Aguas, CONAGUA).	62
Figura 16. Tratamiento con lodos activados (Fuente: Tratamiento de aguas residuales con lodos activados, Joseph Charpentier).	64
Figura 17. Proceso de eliminación de contaminantes con lodos activados (Fuente: Tratamiento de aguas residuales con lodos activados, Joseph Charpentier).	65
Figura 18. Sistema de filtro precolador.	66
Figura 19. Planta de tratamiento de aguas residuales de Teuchitlán, Jalisco (Fuente: Operación y Mantenimiento de Aguas residuales. CEA Jalisco).	67
Figura 20. Diagrama de un sistema tubular para tratamiento de ósmosis inversa (Fuente: Tratamiento de aguas residuales, R. S. Ramalho).	79
Figura 21. Celda electrolítica (Fuente: Tratamiento de aguas residuales, R. S. Ramalho).	80
Figura 22. Panicum virgatum (Pasto varilla) (Fuente: www.naturalista.mx)	92
Figura 23. Brassica napus (Colza) (Fuente: www.naturalista.mx).	92
Figura 24. Usos del agua en México (Fuente: Estadísticas del Agua en México, CONAGUA, 2015).	103
Figura 25. Disponibilidad superficial del agua en México (Fuente: Estadísticas del Agua en México, CONAGUA, 2015).	104

Figura 26. Ubicación de especies tolerantes a la salinidad y actividad petrolera en México (Fuente: Instalaciones petroleras, CNH, 2018).	106
Figura 27. Diseño de proceso propuesto para tratamiento de aguas residuales	109

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación API del petróleo (Fuente: Instituto Estadounidense del Petróleo (American Petroleum Institute, API)).....	14
Tabla 2. Composición química de las aguas de yacimiento (Fuente: Geología del petróleo, J. Guillemot)..	18
Tabla 3. Cationes y aniones en el agua congénita (Fuente: Fuente: Geología del petróleo, J. Guillemot)...	23
Tabla 4. Porcentaje promedio del manejo de agua (Fuente: SPE Oilfield Review, 2010).....	29
Tabla 5. Clasificación de bacterias (Fuente: Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de aguas residuales con el proceso de lodos activados).....	38
Tabla 6. Límites máximos permisibles en aguas costeras (Fuente: NOM-001-SEMARNAT-1996).....	51
Tabla 7. Límites máximos permisibles en suelos (Fuente: NOM-001-SEMARNAT-1996)	52
Tabla 8. Clasificación convencional de tratamientos de aguas residuales (Fuente: Tratamiento de aguas residuales, R. S. Ramalho)	56
Tabla 9. Tamaño de poro en membranas de filtración (Fuente: Tratamiento de aguas residuales, R. S. Ramalho).	78
Tabla 10. Ventajas y desventajas de los tratamientos para la desinfección Fuente: Operación y Mantenimiento de Aguas residuales. CEA Jalisco).....	82
Tabla 11. Análisis físico-químico de la muestra (Fuente: Laboratorio de producción de hidrocarburos y control de la corrosión, IMP).....	85
Tabla 12. Clasificación del agua de riego en función de la salinidad (Fuente: U.S. Salinity Laboratory, 1969).	86
Tabla 13. Clasificación del agua de riego en función del SAR (Fuente: U.S. Salinity Laboratory, 1969)	88
Tabla 14. Clasificación del agua de riego en función del bicarbonato (Fuente: U.S. Salinity Laboratory, 1969).....	88
Tabla 15. Concentración de COT (Fuente: Produced water reuse for irrigation of non-foof biofuel crops: effects on switchgrass and repeseed germination, physiology and bomass yield, elsevier, 2017).	90
Tabla 16. Contenido de cationes en la mezcla (Fuente: Produced water reuse for irrigation of non-foof biofuel crops: effects on switchgrass and repeseed germination, physiology and bomass yield, elsevier, 2017).....	90
Tabla 17. Contenido de Aniones en la mezcla (Fuente: Produced water reuse for irrigation of non-foof biofuel crops: effects on switchgrass and repeseed germination, physiology and bomass yield, elsevier, 2017).....	90
Tabla 18. Características del suelo (Fuente: Produced water reuse for irrigation of non-foof biofuel crops: effects on switchgrass and repeseed germination, physiology and bomass yield, elsevier, 2017).	93
Tabla 19. Tasa de germinación a 21 días (Fuente: Produced water reuse for irrigation of non-foof biofuel crops: effects on switchgrass and repeseed germination, physiology and bomass yield, elsevier, 2017). ..	94

Tabla 20. Porcentaje de germinación a 21 días (Fuente: Produced water reuse for irrigation of non-foof biofuel crops: effects on switchgrass and repeseed germination, physilogy and bomass yield, elsevier, 2017).....	95
Tabla 21. Biomasa medida a los 106 días (Fuente: Produced water reuse for irrigation of non-foof biofuel crops: effects on switchgrass and repeseed germination, physilogy and bomass yield, elsevier, 2017). ..	96
Tabla 22. Longitud medida a los 106 días (Fuente: Produced water reuse for irrigation of non-foof biofuel crops: effects on switchgrass and repeseed germination, physilogy and bomass yield, elsevier, 2017). ..	97
Tabla 23. Conductividad del suelo a 106 días (Fuente: Produced water reuse for irrigation of non-foof biofuel crops: effects on switchgrass and repeseed germination, physilogy and bomass yield, elsevier, 2017).....	99
Tabla 24. Fuga de electrolitos foliares (Fuente: Produced water reuse for irrigation of non-foof biofuel crops: effects on switchgrass and repeseed germination, physilogy and bomass yield, elsevier, 2017). ..	101
Tabla 25. Especies tolerantes a la salinidad en México	105

Resumen

Este trabajo tiene como objetivo principal determinar la factibilidad, desde el punto de vista teórico, del uso de agua asociada a la explotación de hidrocarburos como fuente de irrigación de cultivos de plantas no comestibles, la cual es considerada un residuo dentro de la industria petrolera.

A lo largo de los capítulos se conocerá todo lo referente al agua congénita, sus características principales, métodos utilizados para desecho y/o aprovechamiento dentro de la industria petrolera, así como la tecnología disponible para la separación del agua una vez que se encuentra en superficie.

Dentro del marco legal, se hace referencia a los principales organismos, leyes y normas reguladoras en México, en el tema de manejo y tratamientos de las aguas residuales.

Para este estudio se analizaron las características fisicoquímicas de una muestra de agua congénita de un campo petrolero en México, se realizó el análisis de los contaminantes y como podría afectar a plantas vegetales al ser irrigadas con ciertos niveles de materia orgánica e inorgánica tomando como base experimentos ya realizados con anterioridad por diversas universidades en el mundo y organismos gubernamentales preocupados por este tema.

Se identificaron especies vegetales tolerantes a la alta salinidad del agua producida por la industria petrolera en México. Por otro lado, se ubicaron zonas de actividad petrolera (baterías de separación, estaciones de recolección, estaciones de compresión, plantas de inyección de agua, plantas deshidratadoras y pozos petroleros. Todo esto con el fin de poder establecer la correlación entre zonas productoras de aguas congénitas y zonas susceptibles de riego con éstas.

Finalmente se propone un diseño de una planta de agua que pueda garantizar, que tratar agua residual con determinadas características es factible bajo condiciones favorables de un proyecto de estas magnitudes.

Introducción

Una de las mayores problemáticas que tienen que enfrentar la mayoría de las compañías petroleras es el agua asociada a la producción en un campo petrolero, ya que, a medida que un campo va incrementando la producción de fluidos, aumenta el volumen de agua que sale a superficie. Esto genera problemas desde económicos hasta ambientales que se deben afrontar durante la vida productiva de un yacimiento; sin embargo, cabe aclarar que no todos los yacimientos están asociados a acuíferos, y los que están, son muchas veces beneficiados por dichos acuíferos ya que sirven como mecanismo de empuje al yacimiento, permitiendo así la explotación de hidrocarburo.

En los campos maduros, el agua suele percibirse como un mal necesario. Si bien el agua a menudo impulsa la producción primaria e interviene en la producción secundaria, el exceso de ésta representa un pasivo muy grande y un costo significativo para las compañías petroleras.

Cuando se extrae petróleo de un yacimiento, llegará un momento donde se comenzará a producir agua ya sea de un acuífero asociado o de algún pozo inyector implementado durante el desarrollo del campo, la cual, se producirá junto con los hidrocarburos. Esta agua producida generalmente es usada en procesos dentro de la industria petrolera, como su reinyección para mantener la presión del yacimiento; sin embargo, no todo el volumen producido puede usarse en estos procesos puesto que es tal el volumen en la superficie que es necesario desechar el excedente, reinyectándolo al subsuelo.

Actualmente se están produciendo en promedio de tres a cinco barriles de agua por cada barril de petróleo extraído de un yacimiento (*SPE Oilfield Review 2015*), dependiendo de las condiciones y etapa de producción del mismo, gastándose miles de millones de dólares anuales para poder hacer frente a este problema.

Si se tiene en cuenta la producción mundial de petróleo en 2016 (*BP Statistical Review of World Energy, June 2017*) que es aproximadamente 93 millones de barriles diarios acompañada de 210 millones de barriles de agua, es necesario tener una solución eficaz a este problema; sin embargo, no es sencillo ya que los costos de manejo de agua y posible reutilización son muy altos haciendo que no sea rentable poder hacer el tratamiento necesario para su reutilización.

Es importante destacar que existen muchos países donde la escasez de agua se está convirtiendo en un grave problema, por lo que los gobiernos están buscando alternativas para poder suministrar de agua a su población.

Capítulo 1. Conceptos básicos

1.1. Porosidad (ϕ)

Es una de las propiedades petrofísicas de las formaciones geológicas. La porosidad (ϕ) de un medio poroso se puede definir como la relación de espacio vacío en la roca con respecto al volumen total de ella. La porosidad da una idea de la capacidad de almacenamiento que puede tener la roca para contener fluidos (agua, aceite y/o gas).

Se define como:

$$\phi = \frac{V_P}{V_T} \times 100 [\%]$$

Donde:

ϕ = Porosidad

V_P = Volumen de poros en la roca

V_T = Volumen total de la formación

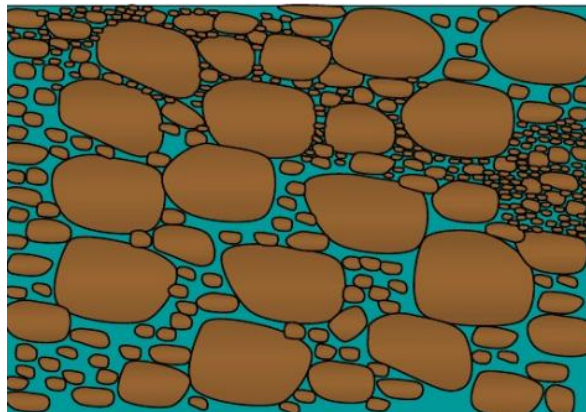


Figura 1. Porosidad de la roca (Fuente: Recapitulación técnica, Halliburton).

1.1.1. Porosidad primaria

Es la porosidad producto del proceso diagenético de la formación del medio poroso. Los huecos entre los granos de los sedimentos constituyen el tipo de porosidad intergranular, diferente de la microporosidad solo por el diámetro de los poros, siendo en ésta última diámetros muy pequeños, los cuales dificultan o impiden el flujo de fluidos a través de ellos. Las rocas sedimentarias clásticas o detríticas tienen este tipo de porosidad.

1.1.2. Porosidad secundaria

La porosidad secundaria es producida después de la formación de la roca, causada por fluidos que reaccionan con la formación produciendo cavernas y vóculos, por disolución, las fuerzas de tensión o compactación por movimientos tectónicos, provocan fisuras, fracturas y fallas. Las rocas sedimentarias no clásticas tienen este tipo de porosidad.

Muchas formaciones pueden presentar ambos tipos de porosidad. Cuando el medio poroso contiene porosidad intergranular y fracturas, se le denomina "Doble porosidad".

1.1.3. Porosidad absoluta (ϕ_a)

Es la relación del espacio poroso total con el volumen total de roca, sin tomar en cuenta si los poros están intercomunicados entre sí.

Se define como:

$$\phi_a = \frac{V_{TP}}{V_T} \times 100 [\%]$$

Donde:

ϕ_a = Porosidad absoluta

V_{TP} = Volumen total de poros en la roca

V_T = Volumen total de la formación

1.1.4. Porosidad efectiva (ϕ_e)

Es la relación del espacio poroso intercomunicado y el volumen total de roca. La porosidad efectiva implica la relación entre el volumen vacío intercomunicado y el volumen bruto de la roca y se puede representar por la siguiente ecuación:

$$\phi_e = \frac{V_p}{V_T} \times 100 \text{ [%]}$$

Donde:

ϕ = Porosidad

V_p = *Volumen de poros comunicados en la roca*

V_T = *Volumen total de la formación*

La porosidad efectiva depende de varios factores tales como el tipo de roca, heterogeneidad del tamaño del grano, empaque de los granos, material cementante, tipo y contenido de arcillas, grado de hidratación, etc., pero la porosidad efectiva será la que más interese al ingeniero petrolero, ya que es un indicador de la conductividad de los fluidos, aunque no es necesariamente una medida de ello.

1.2. Permeabilidad (k)

Una de las características que debe conocerse de un yacimiento, es su capacidad para permitir el flujo de fluidos a través de él. La cuantificación de esta característica es de suma importancia para estudios relativos a la explotación de un yacimiento. Esta propiedad del medio poroso recibe el nombre de "permeabilidad". La expresión que nos permite cuantificar la permeabilidad es conocida como la ley de Darcy, que dice; "la velocidad de un fluido homogéneo en un medio poroso es proporcional al gradiente de presión e inversamente proporcional a la viscosidad del fluido".

$$v_f = \frac{q_f}{A} = \frac{k}{\mu_f} \cdot \frac{dp}{ds}$$

Donde:

$$v_f = \text{Velocidad del fluido } \frac{cm}{s}$$

$$q_f = \text{Gasto del fluido } \frac{cm}{s}$$

$$A = \text{Área de la seccion de flujo } cm^2$$

$$k = \text{Permeabilidad (darcys)}$$

$$\mu_f = \text{Viscosidad (cp)}$$

$$dp = \text{caida de presión (atm)}$$

$$ds = \text{Longitud de desplazamiento (cm)}$$

Despejando la permeabilidad de la ecuación de Darcy obtenemos:

$$k = - \frac{q_f \mu_f}{A} \cdot \frac{ds}{dp}$$

La permeabilidad es una medida de la conductividad de un medio poroso para un fluido. Está referida a su capacidad de permitir el flujo de fluidos a través del sistema de poros intercomunicados.

1.2.1. Permeabilidad absoluta (k_a)

Se denomina permeabilidad absoluta de la roca, a la propiedad que tiene la roca de permitir el paso de un fluido cuando ésta se encuentra saturada al 100% de un fluido homogéneo igual al que se usa como fluido de desplazamiento durante pruebas de laboratorio. La permeabilidad absoluta del medio poroso debe ser la misma para cualquier fluido que no reaccione con el medio poroso y que lo sature al 100%, sin embargo, esta

condición no se cumple con los gases y esto se atribuye al efecto de resbalamiento, ya que el gas no moja los poros, y fluye por dentro y sobre de la superficie del poro.

1.2.2. Permeabilidad efectiva (k_e)

La permeabilidad efectiva de una roca, es la capacidad que tiene la roca para permitir el flujo a un fluido cuando la saturación de este fluido en la roca es menor del 100%. La permeabilidad efectiva se escribe utilizando un subíndice para designar el fluido bajo consideración.

1.2.3. Permeabilidad relativa (k_r)

La permeabilidad relativa se define como “la razón de la permeabilidad efectiva a la permeabilidad absoluta.

$$k_r = \frac{k_e}{k}$$

La permeabilidad relativa a los fluidos, es útil para graficar las curvas de permeabilidad relativa al agua y aceite, para una muestra porosa determinada, en función de la saturación de agua (Figura 2). Con esta curva se pueden calcular la saturación residual de aceite, la saturación crítica de agua y aceite, así como la saturación inicial del agua y aceite.

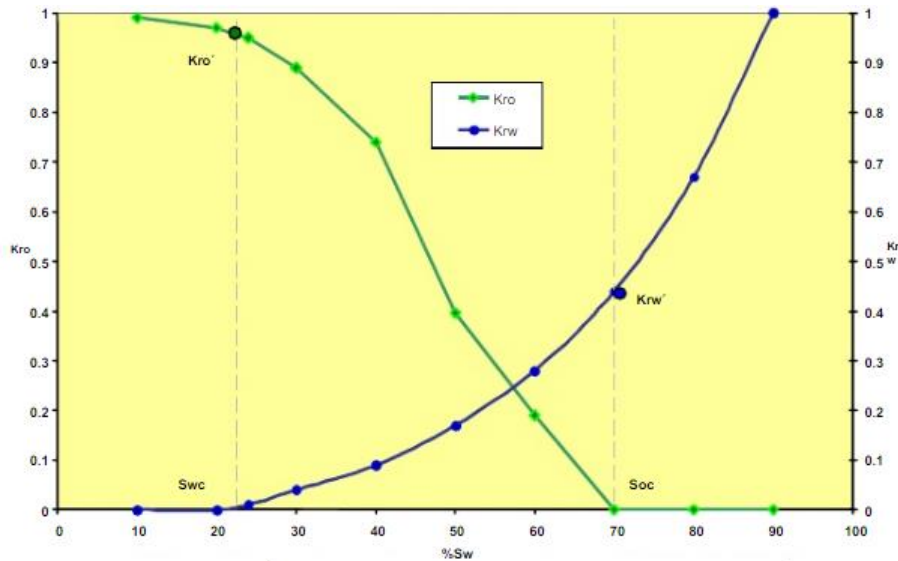


Figura 2. Curva de permeabilidad relativa (Fuente: Recapitulación técnica, Halliburton).

La permeabilidad relativa es el factor más importante en lo que respecta al movimiento de las fases inmiscibles (aceite, agua y gas) dentro del medio poroso. Las curvas de permeabilidad relativa son el resultado de experimentos realizados en el laboratorio, pero su forma depende de los parámetros de flujo de fluidos dentro del yacimiento y depende de variables tales como; geometría del sistema poroso, mineralogía de la formación, permeabilidad absoluta y porosidad, preferencia de la roca para ser mojada, viscosidad de los fluidos, tensión interfacial, ritmo de desplazamiento, presión del yacimiento y presencia de fases inmóviles o atrapadas.

1.3. Saturación (S)

En un yacimiento normalmente está presente más de un solo fluido. Los poros de la roca inicialmente fueron llenados con agua en su totalidad. Los hidrocarburos más ligeros se movieron por efecto gravitacional hacia la parte más alta de la estructura hasta alcanzar posiciones de equilibrio hidrostático y dinámico, desplazando en su recorrido agua de los intersticios hasta una saturación de agua congénita, de aquí que cuando un yacimiento es descubierto, este puede contener aceite, gas y agua. El término “saturación de fluidos” es utilizado para indicar la presencia de los fluidos en la formación.

La saturación de fluidos se define como; “La fracción o porción del espacio poroso ocupado por un fluido particular a las condiciones de yacimiento”.

$$S_f = \frac{V_f}{V_p}$$

Donde:

S_f = Saturación de fluidos

V_f = Volúmen de fluidos

V_p = Volúmen de poros

Los fluidos se acomodan en el poro de acuerdo a su gravedad específica (Figura 3), y por fuerzas capilares, siendo el agua la más pesada y por lo regular es la que moja la superficie, por encima está el aceite y más arriba está el gas.



Figura 3. Distribución de los fluidos en los poros.

La saturación es otra propiedad petrofísica, la cual puede recibir distintos nombres, dependiendo del momento en que se quiera conocer, en la vida productiva de un yacimiento.

1.3.1. Saturación inicial

Es la saturación del yacimiento, cuando es descubierto, a las condiciones iniciales, la saturación de hidrocarburos debe ser muy elevada en comparación con la del agua. Pero estas condiciones no se podrán seguir manteniendo a lo largo de la vida productiva del yacimiento.

1.3.2. Saturación crítica

Se llama saturación crítica al valor de la saturación de un fluido a partir del cual el fluido correspondiente comienza a moverse, este valor es alcanzado mediante un proceso por el cual la saturación de dicho fluido se incrementa.

1.3.3. Saturación residual

Se le llama saturación residual a la saturación de un fluido después de un proceso de producción. Esta saturación se presenta cuando el proceso de desplazamiento no es efectivo y parte del fluido no es producido, quedando atrapado en el yacimiento. Pero el valor de la saturación residual, no es fijo, no hasta que se abandona el yacimiento, ya que puede cambiar en periodos largos de producción, o por la implementación de un nuevo método de desplazamiento, entre otros factores que ayuden a recuperar más del fluido atrapado. También se le llama saturación residual de aceite "Sor", al valor por debajo del cual no puede reducirse la saturación en un sistema de agua-aceite.

1.3.4. Saturación de agua irreducible

La saturación de agua irreducible, es la saturación mínima de agua que permanece como fase discontinua dentro del medio poroso, a las condiciones necesarias para que el agua no pueda fluir por el sistema cuando se aplica una diferencia de presión. Es diferente de la saturación inicial la cual en algunos casos es mayor que la saturación irreducible.

1.4. Viscosidad (μ)

La viscosidad es una propiedad de los fluidos, la cual tiende a oponerse a su flujo cuando se le aplica una fuerza tangencial. Las variaciones de esta propiedad se ven afectadas con cambios de presión y temperatura, aunque no se producen los mismos efectos en todos los fluidos. Para un gas ideal, al incrementar la temperatura la viscosidad de este se incrementa, este efecto es completamente opuesto para los líquidos, la viscosidad para un gas ideal es independiente de la presión. Sin embargo, para los gases reales, ambas condiciones deben ser modificadas, los gases reales a alta presión tienden a comportarse como líquidos.

La viscosidad de los líquidos se incrementa al aumentar la presión y disminuye cuando se incrementa la temperatura. Todas las variaciones concernientes a la viscosidad del aceite tanto a las condiciones de superficie como a las condiciones del yacimiento deberán ser consideradas para una eficiente extracción del mismo. El aceite en el yacimiento se encuentra a una presión y temperatura mucho mayor que en la superficie; por tanto, el aceite tendrá una cantidad de gas en solución, el efecto de este gas disuelto es el de disminuir la viscosidad del aceite, siendo uno de los efectos más importantes. Entre las condiciones de superficie y yacimiento el incremento de temperatura tenderá por sí solo a disminuir la viscosidad del aceite, pero el incremento en la presión incrementará la viscosidad del aceite.

1.5. Mojabilidad (θ)

Se refiere a la interacción de un sólido y un líquido, se define como la capacidad de un líquido a esparcirse o extenderse sobre una superficie sólida en la presencia de otro fluido inmisible. La mojabilidad es afectada por varios factores, de la superficie sólida y del tipo de fluido, tales como el tipo de contacto entre los fluidos y la superficie de la roca, heterogeneidad de la superficie, rugosidad y mineralogía de la superficie de la roca y composición del agua y del aceite.

Dependiendo de las propiedades humectantes de la roca, la fase mojante, ocupa las partes menos favorables de la roca, en forma de una película delgada sobre las partes de los granos. La fase no mojante, ocupa las partes más favorables, es decir la parte central de los poros. Se puede dar el caso de que la fase mojante sea el aceite, pero es muy raro encontrarse con estos casos, por lo general la fase mojante es el agua.

La preferencia mojante de un fluido determinado sobre la superficie de la roca, se mide en términos del ángulo de contacto (θ). Éste es el ángulo medido entre una tangente sobre la superficie de la gota trazada desde el punto de contacto y la tangente a la superficie, a través de la fase mojante. Cuando el ángulo de contacto es menor de 90° , el fluido moja la superficie y se llama fluido mojante, cuando es mayor de 90° , el fluido se denomina no mojante, para un caso donde los fluidos tienen igual afinidad por la superficie el ángulo es de 90° y se llama mojabilidad neutra.

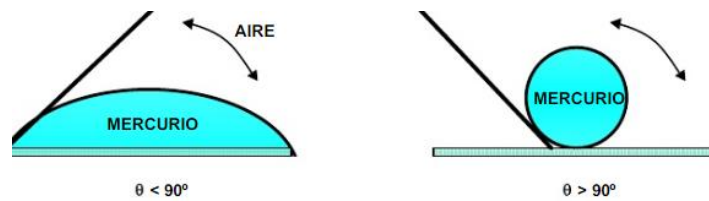


Figura 4. Ejemplo de mojabilidad (Fuente: Recapitulación técnica, Halliburton).

1.6. Tensión interfacial (σ)

Es el resultado de efectos moleculares por los cuales se forma una interfase o superficie que separa dos líquidos, si la tensión interfacial es grande, se dice que los líquidos son inmiscibles entre sí.

1.7. Presión capilar (P_c)

La presión capilar es la diferencia de presión que existe a lo largo de la interfase que separa a dos fluidos inmiscibles. Si se tiene conocimiento de la mojabilidad, la presión capilar será definida como la diferencia de presión entre la fase mojante y la no mojante.

$$P_c = P_{nm} - P_m$$

La presión capilar en los yacimientos de hidrocarburos es el resultado de los efectos combinados de la tensión interfacial y/o de la tensión superficial, del tamaño y forma de los poros, de la saturación de fluidos y del valor de la mojabilidad del sistema roca-fluido. En el yacimiento hay fases inmiscibles y la fuerza que mantiene a estos fluidos en equilibrio son expresiones de fuerzas capilares.

La presión capilar se incrementa a medida que el diámetro de los poros disminuye si se mantienen las otras condiciones constantes:

$$P_c = \frac{2\sigma\cos\theta}{r}$$

Donde:

P_c = Presión capilar

σ = Tensión interfacial

θ = Ángulo de contacto

r = Radio capilar

1.8. Densidad (ρ)

La densidad de una sustancia, es una magnitud referida a la relación de la cantidad de masa contenida en un determinado volumen, es una magnitud intensiva, pues no depende de la cantidad de materia.

$$\rho = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}}$$

1.8.1. Densidad relativa (γ)

La densidad relativa de una sustancia, es la relación que existe entre su densidad y la de otra sustancia de referencia, en consecuencia, es una magnitud adimensional, también es llamada gravedad específica.

Generalmente la densidad del petróleo es medida a partir Escala de gravedad específica desarrollada por el Instituto Estadounidense del Petróleo (American Petroleum Institute, API) para medir la densidad relativa de diversos líquidos de petróleo, expresada en grados. La gravedad API está graduada en grados en un instrumento de hidrómetro y fue diseñada de manera tal que la mayoría de los valores quedaran entre 10° y 70° de gravedad API.

La fórmula arbitraria utilizada para obtener este efecto es:

$$^{\circ}API = \frac{141.5}{\gamma_o} - 131.5$$

Donde:

$$\gamma_o = \frac{\rho_o}{\rho_w}$$

$\gamma_o =$ Densidad específica del aceite

$\rho_o =$ Densidad del aceite

$\rho_w =$ Densidad del agua

En la escala API, a medida que se incrementan los grados API, el petróleo será más ligero, en cambio, de tener un grado API menor, el crudo comenzará a ser más pesado.

En la Tabla 1 se muestra la clasificación internacional de los crudos:

Tabla 1 Clasificación API del petróleo (Fuente: Instituto Estadounidense del Petróleo (American Petroleum Institute, API)).

Aceite crudo	Densidad (g/ cm³)	Densidad grados API
Extrapesado	>1.0	10.0
Pesado	1.0 - 0.92	10.0 - 22.3
Mediano	0.92 - 0.87	22.3 - 31.1
Ligero	0.87 - 0.83	31.1 - 39
Superligero	< 0.83	> 39

Capítulo 2. Agua asociada a la producción

2.1. Agua de formación

El agua está presente en todas las etapas que involucran la extracción de petróleo, desde la explotación hasta el abandono del campo, afectando principalmente el desarrollo y producción de un pozo. Sin embargo, puede funcionar como un elemento que desplaza al hidrocarburo de manera natural. Conocer el contacto agua-aceite es un factor fundamental para determinar la cantidad de petróleo en sitio. Un yacimiento que contiene agua, petróleo y gas puede tener una distribución típica de los fluidos (Figura 6) antes de comenzar la producción y la inyección.

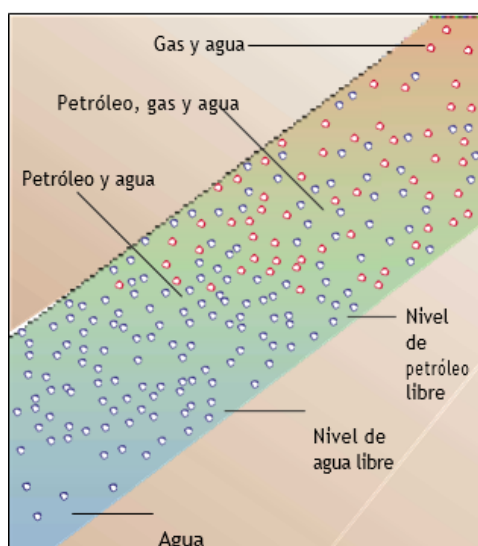


Figura 5. Distribución de los fluidos en el yacimiento (Fuente: SPE Oilfield Review, 2010).

El petróleo crudo contiene sales y agua emulsionada, las cuales deben ser removidas antes de su refinación. En México, PEMEX realiza la desalación y deshidratación del crudo mediante la separación de agua por campo eléctrico, que debilita la barrera interfacial agua-aceite. En este proceso se genera un efluente de agua residual llamado “agua congénita”. Su composición depende del tipo de petróleo que se extrae y procesa, crudo ligero o crudo Maya (pesado), así como de las técnicas de extracción: ascenso por

bombeo o por inyección de gases, o vapor, y deshidratación con el uso de polímeros. Generalmente, las aguas congénitas tienen sales inorgánicas en altas concentraciones e hidrocarburos. La disposición de este desecho es difícil por los peligros de salinización.

La inyección de agua es el método más económico y, por lo tanto, el más utilizado en las plantas de extracción nacionales. El uso de agua congénita en los pozos de inyección ofrece una oportunidad para su aprovechamiento, sin la necesidad de remover la salinidad, ya que el agua es inyectada para mantenimiento de presión en el yacimiento. Además, con el uso de las aguas congénitas en la recuperación de los yacimientos, se lograría una disminución del consumo de agua de primer uso. La inyección de agua congénita sin ningún tratamiento previo, más que una simple sedimentación, provoca problemas de colmatación en los pozos de inyección, así como taponamiento de las formaciones, que generalmente son areniscas de grado medio a fino (Mijaylova, et. al. 2005).

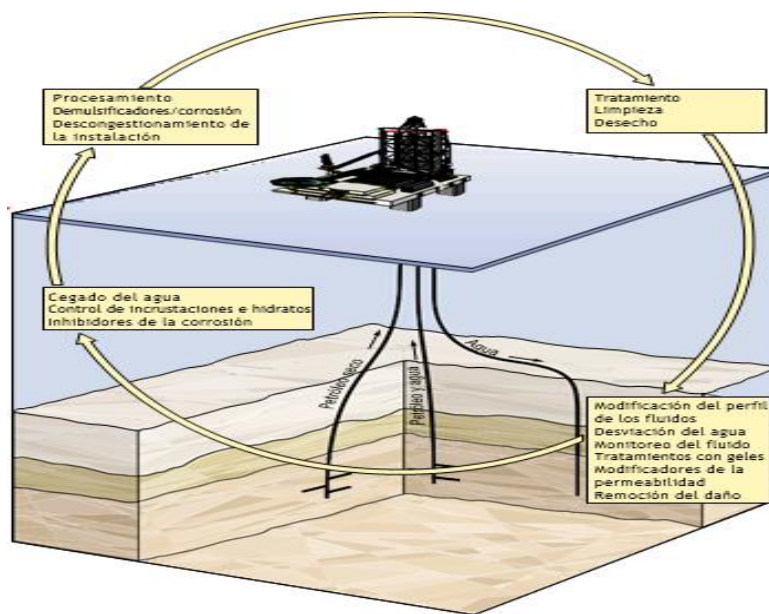


Figura 6. Ciclo de inyección del agua (Fuente: SPE Oilfield Review, 2015).

2.1.1. Tipo de agua de formación

Un yacimiento puede estar asociado o no a un acuífero, el cual representa un potencial problema para la explotación del recurso. Los acuíferos son cuerpos de agua subterránea,

generalmente saladas, que contaminan el lodo y modifican las características durante el proceso de perforación, por citar un ejemplo.

En la roca almacén, el agua está presente bajo dos formas principales: agua libre e intersticial.

Agua libre

Es el agua que ocupa los poros de la roca almacenadora, que no están ocupados por hidrocarburos. También conocidas como “agua de muro” (“bottom wáter” o “edge wáter”). Puede ponerse en movimiento relativamente fácil ya que se desplaza hacia los puntos de baja presión.

Agua intersticial

En el interior de un yacimiento, la totalidad de los poros, no está ocupada por hidrocarburos, queda siempre una cantidad de agua que ha podido ser desplazada por la llegada del petróleo o gas. Se mantiene, en parte por las fuerzas capilares y la adsorción de los minerales presentes en la roca, en particular minerales arcillosos. Es su volumen el que se utiliza para medir el valor de saturación relativa en el yacimiento.

2.1.2. Composición de las aguas de yacimiento

Todas las aguas de yacimiento, debido al hecho de que han estado en contacto con los minerales de las rocas, contienen sales disueltas. De la concentración y naturaleza de estas sales, dependen de todas las propiedades particulares estas aguas.

El estudio de la composición de las aguas, puede ayudar para trazar la evolución y reconstrucción de la historia geológica de una cuenca y la acumulación de hidrocarburos que existen en ese espacio.

Los análisis cuantitativos de las aguas de yacimiento, pueden presentarse de diferentes formas. Deben expresar tanto la concentración total, como la concentración de cada una de las sales disueltas, o mejor aún, cada uno de los iones presentes en la solución.

Los valores, se expresan comúnmente:

$$\left[\frac{\text{gramos}}{\text{litro}} \right] \quad \text{ó} \quad \text{partes por millón [p. p. m.]}$$

En partes ppm, por ejemplo, un miligramo de sal por kilogramo de solución. Para las concentraciones pequeñas, el valor de ppm, es aproximadamente igual al valor en miligramos por litro. Para grandes concentraciones es necesario tener en cuenta la densidad de la solución.

La mayor parte de las aguas de yacimiento, son saladas, pero la concentración de las sales disueltas, varía en proporciones importantes. Algunos yacimientos que contienen agua dulce no sobrepasan algunos centenares de [mg/l] (un agua que contenga 1000 ppm. de cloruro de sodio, tiene un sabor apenas perceptible).

En un mismo horizonte de la roca almacén, la concentración de las sales disueltas varía ampliamente de un punto a otro. Uno de los efectos no despreciables desde el punto de vista petrolífero, de la presencia de sales disueltas, es el aumento de la densidad de las soluciones, y como consecuencia, el aumento de la presión en el acuífero.

Generalmente, la concentración de las sales disueltas, aumenta con la profundidad, por una parte, debido al hecho de que se establece un equilibrio de las aguas en función de su densidad. Las aguas con mayor concentración se encuentran estructuralmente más bajas y, por otra parte, debido al hecho de que las aguas más profundas, son las que necesariamente han permanecido más tiempo en las formaciones sedimentarias, y han tenido más posibilidades de disolver las sales; sin embargo, esto no es una regla general ya que se conocen casos, en que, por el contrario, las aguas de los mantos más profundos son más dulces que las de los mantos más superficiales.

En la Tabla 2 se encuentran los elementos más frecuentes en las aguas de un yacimiento:

Tabla 2. Composición química de las aguas de yacimiento (Fuente: Geología del petróleo, J. Guillemot)

Tipo de ion	Clase	Elemento
Positivo (+)	Metales alcalinos	Sodio (<i>Na</i>)
		Potasio (<i>K</i>)
	Alcalinos-térreos	Calcio (<i>Ca</i>)
		Magnesio (<i>Mg</i>)
Negativo (-)	Ácidos fuertes	Sulfatos (<i>SO₄</i>)
		Cloruros (<i>Cl</i>)
	Ácidos débiles	Carbonatos (<i>CO₃</i>)
		Bicarbonatos (<i>CO₃H</i>)

A veces para caracterizar una salmuera, que es agua que contiene más sal inorgánica disuelta que el agua de mar habitual (la concentración del agua de mar, tiene una medida de 35000 ppm.), se emplean los términos siguientes:

- Salinidad primaria, correspondiente a los ácidos fuertes (SO_4 , Cl combinados con bases primarias (Na , K)).
- Salinidad secundaria, correspondiente a los ácidos fuertes, combinados con bases secundarias (Ca , Mg).
- Alcalinidad primaria, ácidos débiles (CO_3 , CO_3H) con bases primarias.
- Alcalinidad secundaria, ácidos débiles con bases secundarias.

Además de los elementos principales, se puede encontrar bromo, iodo, bario, estroncio, hierro, mercurio, ácidos orgánicos, entre otros. Aunque algunos de ellos pueden alcanzar concentraciones relativamente elevadas, la mayor parte solamente están presentes en mínimas concentraciones.

2.1.3. Origen de las aguas subterráneas

En una cuenca sedimentaria los orígenes principales que se encuentran en las rocas porosas son:

1. Las aguas meteóricas, que son las aguas procedentes de las precipitaciones, infiltradas por los afloramientos, que circulan a través de los sedimentos. Estas aguas dulces, cargadas de oxígeno y gas carbónico, disuelven las rocas por las que circulan, aumentando su concentración en sales poco a poco.
2. Las aguas muertas, llamadas también fósiles, son las aguas de mar aprisionadas desde la sedimentación y conservadas en el interior de los terrenos. Debido al lavado y ataque químico de los minerales y a los cambios de base, su composición se ha modificado poco a poco.

Se podría pensar que las aguas de yacimiento y más particularmente el agua intersticial, son aguas muertas, resultado de su diferencia de composiciones químicas, con respecto al agua de mar; sin embargo, por la complejidad de los fenómenos químicos en este proceso, la identificación de las aguas de yacimiento con aguas muertas resulta incierta.

Además, la intrusión de las aguas meteóricas modificadas por su circulación, origina mezclas igualmente complejas, que van cambiando con respecto a la profundidad. Solo

las aguas en contacto con los hidrocarburos, parece que pueden adquirir características químicas particulares.

2.2. Aguas congénitas

Las aguas congénitas o agua saladas, son un subproducto de la extracción de crudo al igual que el gas natural, que fluye a través del pozo, se encuentran dentro de la roca, asociada a la presencia de hidrocarburos. Contiene sales disueltas, como cloruros de calcio y sodio, carbonatos de sodio, cloruros de potasio, sulfatos de calcio o de bario, entre otros; incluso puede contener algunos metales.

2.2.1. Clasificación del agua producida según su origen

El agua se encuentra presente en la gran mayoría de los campos petroleros y es el fluido más abundante en el campo. Con respecto a la producción de hidrocarburos, es fundamental distinguir entre el agua de barrido, el agua buena y el agua mala.

Agua de barrido

Proviene de un pozo inyector o de un acuífero activo que contribuye al barrido del petróleo del yacimiento. El manejo de este tipo de agua es una parte fundamental para el manejo del yacimiento y puede construir un factor determinante en la productividad de los pozos y de las reservas finales.

Agua buena

Es el agua producida dentro del pozo a una tasa inferior al límite económico de la relación agua-petróleo. Es una consecuencia inevitable del flujo de agua a través del yacimiento, y no se puede eliminar. La producción del agua buena tiene lugar cuando existe un flujo simultáneo de petróleo y agua en toda la matriz de la formación.

Agua mala

Se puede definir como el agua producida dentro del pozo, que no produce petróleo, o bien cuando la producción de petróleo no es suficiente para compensar el costo asociado con

el manejo de agua, es decir, es agua producida por encima del límite económico de la relación agua-petróleo.

El agua buena necesita ser producida junto con el petróleo y no se puede mitigar sin parar el flujo de hidrocarburos. La separación en el fondo puede ser una solución, que puede reducir los tiempos para llegar a la producción de agua mala que no ayuda a la producción provocando la disminución de la presión.

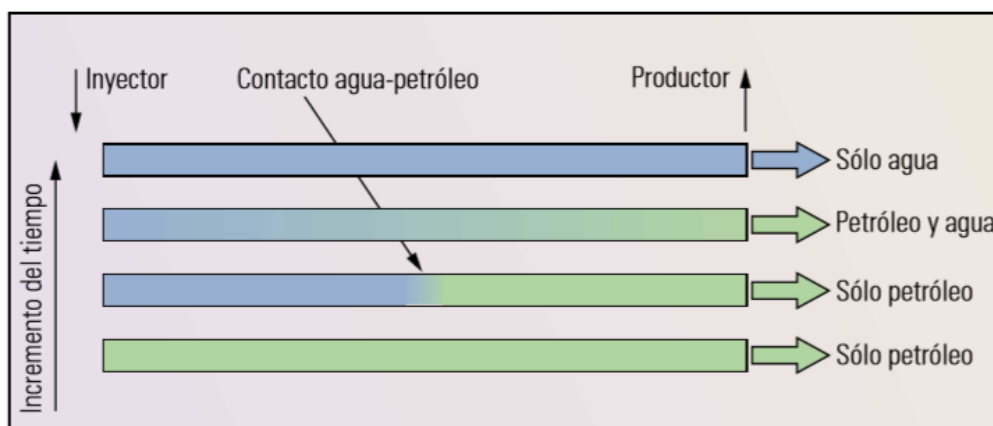


Figura 7. Producción de agua en el tiempo (Fuente: SPE Oilfield Review, 2010)

2.2.2. Propiedades de las aguas congénitas

Durante cientos de millones de años el agua subterránea ha tenido contacto con varias formaciones rocosas y ha disuelto a ciertos compuestos. Para determinar un tratamiento adecuado, previo al método de eliminación elegido, se requiere de un análisis preciso del agua producida.

Las aguas producidas son una mezcla de materiales orgánicos e inorgánicos que varían dependiendo de la localización geológica de los campos, el tipo de producción efectuada en el campo y el tipo de hidrocarburo producido genera cambios en las propiedades físicas y químicas del agua de producción.

Sin embargo, la composición del agua tiene características similares en yacimientos donde se produce agua y/o gas.

Generalmente, los principales componentes del agua asociada a la producción incluyendo un proceso de inyección de agua son:

- Orgánicos disueltos
- Metales pesados
- Productos químicos asociados a la inyección de agua
- Minerales disueltos
- Sólidos
- Gases disueltos
- Bacterias

Los riesgos ambientales que se presentan en el manejo y disposición de las aguas congénitas (*UNESCO-WHO, 1998*) son:

1. La eventual contaminación de acuíferos con el proceso de inyección a formaciones receptoras.
2. La contaminación de aguas nacionales si no se cuenta con parámetros de limpieza.
3. La contaminación del suelo cuando se producen derrames accidentales en su transporte.

La tendencia mundial coincide en que las opciones óptimas para la disposición de las aguas congénitas asociada a la producción de hidrocarburos son su inyección en formaciones receptoras subterráneas, o su disposición en el mar.

En México, durante el 2001, en la explotación de petróleo crudo y gas natural, se produjeron 12.28 millones de metros cúbicos de agua congénita, de los cuales se reinyectó 87.9 % y se dispuso en cuerpos receptores que son aguas nacionales el 12.1% restante (*PEMEX, 2001*).

Los componentes primarios de las aguas asociadas a la producción 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. Por ejemplo, la preocupación con aguas de inyección tiende a realzar aquellos cationes que tienden a formar sales o compuestos insolubles y que llevan a la obstrucción del sistema, mientras que el agua que se elimina al océano se analiza fundamentalmente para determinar el contenido de aceite y grasa.

En la Tabla 3 se encuentran los componentes normalmente encontrados en las aguas congénitas:

Tabla 3. Cationes y aniones en el agua congénita (Fuente: Fuente: Geología del petróleo, J. Guillemot)

Cationes (+)	Aniones (-)
Calcio (<i>Ca</i>)	Cloruro (<i>Cl</i>)
Magnesio (<i>Mg</i>)	Carbonato (<i>CO₃</i>)
Sodio (<i>Na</i>)	Bicarbonato (<i>HCO₃</i>)
Hierro (<i>Fe</i>)	Sulfato (<i>SO₄</i>)
Bario (<i>Ba</i>)	Cianuro (<i>CN</i>)
Estroncio (<i>Sr</i>)	
Radio (<i>Ra</i>)	
Arsénico (<i>Ar</i>)	
Cadmio (<i>Cd</i>)	
Zinc (<i>Zn</i>)	
Cobre (<i>Cu</i>)	
Mercurio (<i>Mg</i>)	
Níquel (<i>Ni</i>)	
Plomo (<i>Pb</i>)	
Azufre (<i>S</i>)	
Cloro (<i>Cl</i>)	

Cationes

Calcio: los iones son los componentes principales de las salmueras de yacimientos petrolíferos. El ion calcio se combina fácilmente con bicarbonatos, carbonatos y sulfatos para formar precipitados insolubles.

Magnesio: los iones se presentan solamente en bajas concentraciones y también forman incrustaciones. Normalmente se encuentra como un componente de la incrustación del carbonato de calcio.

Sodio: es el catión más abundante en las salmueras de yacimientos petrolíferos. Generalmente se halla en concentraciones superiores a 35,000 partes por millón (ppm). El sodio generalmente no presenta problemas en el manejo, pero vuelve al agua no apta para el consumo humano o de animales, y es a menudo fatal para la vida vegetal.

Hierro: naturalmente se halla en concentraciones muy bajas. Su presencia muchas veces indica problemas de corrosión. El hierro también se combina con los sulfatos y materias orgánicas para formar un lodo de hierro, y es particularmente susceptible de formar lodos si hay ácidos presentes.

Bario: es uno de los metales pesados, y se puede combinar con los sulfatos para formar sulfato de bario insoluble. Puede encontrarse en el medio ambiente en niveles muy bajos. Los componentes de bario son utilizados en la industria petrolera para hacer lubricantes para los taladros de perforación. Se disuelve fácilmente en el agua. Aún en cantidades pequeñas puede causar grandes problemas. El bario usualmente se queda en la superficie de los suelos o en el sedimento de las aguas. Cuando los peces y otros organismos acuáticos lo absorben se acumula en sus cuerpos. Todos los metales pesados tienden a ser tóxicos para los seres humanos en cantidades muy pequeñas, y tienden a concentrarse en la población marina (crustáceos, camarones, etc.) y ciertas plantas.

Estroncio y Radio: pueden ser radioactivos y pueden concentrarse en moluscos tales como las ostras. También pueden formar costras, pero generalmente solo se encuentran como trazas en productos de calcio.

Arsénico: se encuentra en forma natural en las rocas y en el suelo. Conforme el agua erosiona las rocas, esta puede disolver el arsénico. La exposición al arsénico puede causar problemas a la salud. Sus compuestos son extremadamente tóxicos. Produce erosión de los depósitos naturales de agua.

Cadmio: el cadmio se encuentra principalmente en la corteza terrestre. El cadmio contamina el ambiente principalmente por el suelo, porque se encuentra en estiércol y pesticidas. El cadmio en las aguas residuales, también puede entrar al aire por la quema de combustibles fósiles. Es fuertemente adsorbido por la materia orgánica del suelo lo que da como consecuencia que las plantas lo absorban fácilmente.

Zinc: existe de forma natural en el aire, el agua y el suelo. Su concentración está aumentando por causas no naturales, debido al uso del zinc en las actividades del hombre, como actividades industriales, minería, combustión de carbón, entre otras. Algunos peces pueden acumular zinc en sus cuerpos cuando viven en causas contaminados de zinc. Puede encontrarse acumulado en suelos. Es soluble en agua y localizado en el subsuelo contaminando el agua subterránea.

Cobre: puede ser liberado al medio ambiente, tanto por actividades humanas como por procesos naturales, en procesos como la minería, producción de metales, descomposición de la vegetación, incendios forestales, entre otras. Cuando el cobre termina en el suelo se combina a la materia orgánica y los minerales.

Mercurio: puede ser encontrado de forma natural en el ambiente, como forma de metal, como sales de mercurio o mercurio orgánico. El mercurio entra al ambiente como resultado de la ruptura de minerales de roca y suelos, y su exposición al viento y agua. La mayoría de mercurio liberado al ambiente por actividades del hombre es debido a la quema de

combustibles fósiles, la minería, la fundición y la combustión de residuos sólidos que eventualmente termina en suelos y aguas superficiales. Los microorganismos pueden absorberlo causando daños en ellos. Los peces son organismos que pueden absorber gran cantidad de mercurio del agua acumulándose en ellos. Este elemento incluso en cantidades mínimas (0.001 mg/l) puede ser altamente peligroso.

Níquel: el níquel es liberado al ambiente por plantas de energía y los incineradores de basura. Se deposita en el suelo o cae en reacción con las gotas de lluvia. Puede terminar en la superficie del agua, cuando es parte de aguas residuales. Es absorbido por el suelo y puede alcanzar el agua subterránea. Las altas concentraciones de níquel en los suelos pueden causar daños a las plantas, disminuyendo su crecimiento.

Plomo: generalmente se le considera un contaminante tóxico, las sales de plomo y los compuestos orgánicos del plomo son dañinos para los organismos, como plantas ya que estas pueden absorber grandes cantidades perjudicando su crecimiento.

Azufre: se puede encontrar frecuentemente en la naturaleza, presenta un olor desagradable y a menudo son altamente tóxicos para la flora y fauna. Sin embargo, grandes cantidades de azufre elemental se utilizan en diversos productos y procesos industriales, como fertilizante, cementos, medicinas, drogas, jabones, refrigerantes y otros productos.

Aniones

Cloruros: son casi siempre uno de los componentes principales de las salmueras. El problema principal del manejo de los cloruros es que la corrosividad de la salmuera aumenta drásticamente con el contenido de cloruro. Además el contenido de cloruro generalmente es demasiado elevado para que el agua sea utilizable como agua potable para los seres humanos o el ganado, y es muchas veces lo suficientemente elevado como para matar la mayor parte de la vegetación.

Carbonatos y Bicarbonatos: los carbonatos y bicarbonatos presentes en cuerpos naturales de agua dulce se originan generalmente del desgaste y disolución de rocas en la cuenca que contienen carbonatos tales como la piedra caliza. Son de los principales formadores de incrustaciones en las operaciones de extracción de hidrocarburos.

Sulfatos: al desplazarse el agua a través de formaciones rocosas y suelos que contienen minerales sulfatados, una parte del sulfato se disuelve en las aguas subterráneas. Los altos niveles de sulfatos pueden corroer las tuberías. Las aguas de las minas y los efluentes industriales contienen grandes cantidades de sulfatos. Es uno de los principales elementos disueltos en la lluvia.

Cianuro: pueden ocurrir en forma natural o ser manufacturados, la mayoría son venenos altamente efectivos. Son compuestos potencialmente tóxicos, ya que un cambio en el pH puede reaccionar generando compuestos altamente tóxicos en el agua. Algunas bacterias, hongos y algas pueden producir cianuro. Puede encontrarse en plantas. Las fuentes principales de cianuros en el agua son por procesos de minería, industrias químicas y las instalaciones de tratamiento de aguas residuales.

Otras propiedades importantes que se deben considerar:

- pH
- Sólidos en suspensión (cantidad, tamaño, forma, composición)
- Turbidez
- Temperatura
- Demanda bioquímica de oxígeno
- Sólidos disueltos totales
- Ácido Sulfhídrico (H_2S)
- Contenido bacteriano
- Contenido de petróleo

pH: es una medida de acidez o alcalinidad, es un parámetro de gran importancia, tanto para aguas naturales como para residuales. En aguas residuales, un nivel inadecuado de pH presenta dificultades para el tratamiento con procesos biológicos. Un pH neutro es de 7.0, con un rango entre 6.5 y 7.5 para aguas naturales. Los pH fuera de esta escala conducen a la degradación de la vegetación y a la mortandad de los peces, aunque se informa que hay especies de peces que sobreviven a pH entre 5 a 8.5. El pH puede cambiar rápidamente una vez que se toma la muestra y, de ser posible, deberá medirse en el lugar.

Contenido de sólidos en suspensión: es la cantidad o porción de sólidos que pueden separarse por filtrado de un volumen dado. El incremento de peso del filtro representa el total de sólidos suspendidos. Están constituidos por sólidos sedimentables y materia orgánica en suspensión y se usa para estimar la tendencia de taponamiento de los sistemas de inyección.

Sólidos disueltos totales: son las sustancias orgánicas e inorgánicas solubles en el agua y que no son retenidas en algún material filtrante (membrana con poros de $2.0 \mu m$ o más pequeños). Afecta la calidad de un cuerpo de agua, en el caso para consumo humano un alto contenido de sólidos disueltos, no tiene un sabor agradable. En la flora, afecta el crecimiento de la planta y fertilidad de los suelos.

Demanda bioquímica de oxígeno: este parámetro mide el contenido de materia orgánica biodegradable que posee un cuerpo de agua, y la cantidad de oxígeno necesario para su descomposición. Expresa la cantidad de materia orgánica que puede ser consumida u oxidada, por una población bacteriana en una muestra de agua. Se basa en la comparación del oxígeno disuelto, inicialmente en una muestra, con el incubado durante cinco días a una temperatura estandarizada de 20 °C. Cuando se descargan aguas con alta DBO (demanda bioquímica de oxígeno) a un cuerpo de agua, las bacterias y otros microorganismos disponen de una fuente rica de alimentos, lo que permite que se reproduzcan con rapidez consumiendo el oxígeno del agua de forma tal que los peces y otros organismos acuáticos mueren.

Contenido de petróleo: es la cantidad de petróleo disperso en el agua producida. Muchas veces se ve como iridiscencia sobre las aguas donde se elimina o derrama, y causa problemas severos. Estos incluyen la toxicidad para los peces, la reducción de la aireación, sabores y olores y la interferencia con las plantas de tratamiento de agua. Si se descarga el agua en la superficie es un problema estético y, a menudo, tóxico para los mamíferos marinos y para las aves. En pozos de inyección puede causar emulsión en la formación.

2.3. Instalaciones de superficie

Las instalaciones de superficie separan el agua del petróleo y la procesan hasta lograr una especificación adecuada para desecharla en el medio ambiente o para reinyectarla. El gas se envía a una planta de procesamiento o simplemente se quema, mientras que el petróleo se somete a un proceso de eliminación de impurezas mediante el cual se hace el desalado (quitar sal) del petróleo hasta que su concentración baje al 0.5 o al 1% dependiendo las condiciones de entrega que cada compañía privada o estatal tenga. El agua, resultado de esta separación, generalmente se reinyecta para su eliminación y para mantener la presión del yacimiento. En una instalación típica de tratamiento de agua para inyección, todas las corrientes de agua de cada etapa del proceso de separación, se somete a un proceso de eliminación de los restos de petróleo hasta lograr un nivel compatible con la descarga al medio ambiente o a la formación receptora, que por lo regular entre 10 y 40 ppm. En la etapa de filtración para remoción de sólidos se utiliza un filtro de 10 a 50 micrones, esto se hace para evitar problemas con el equipo y la formación.

Las instalaciones de superficie típicas (Figura 8) para el manejo de agua en la superficie incluyen separadores primarios de aceite, agua y gas; sistemas para remover impurezas remanentes de petróleo del agua, sistemas de filtración de sólidos, además de

tratamientos químicos. Estos sistemas permiten garantizar que el agua reinyectada sea compatible con la formación receptora y que no cause otros problemas, como depósitos de residuos minerales y corrosión en el pozo ni daño al yacimiento.

Igualmente, en la figura 8, se muestran los porcentajes relativos del ciclo del agua desde el pozo productor:

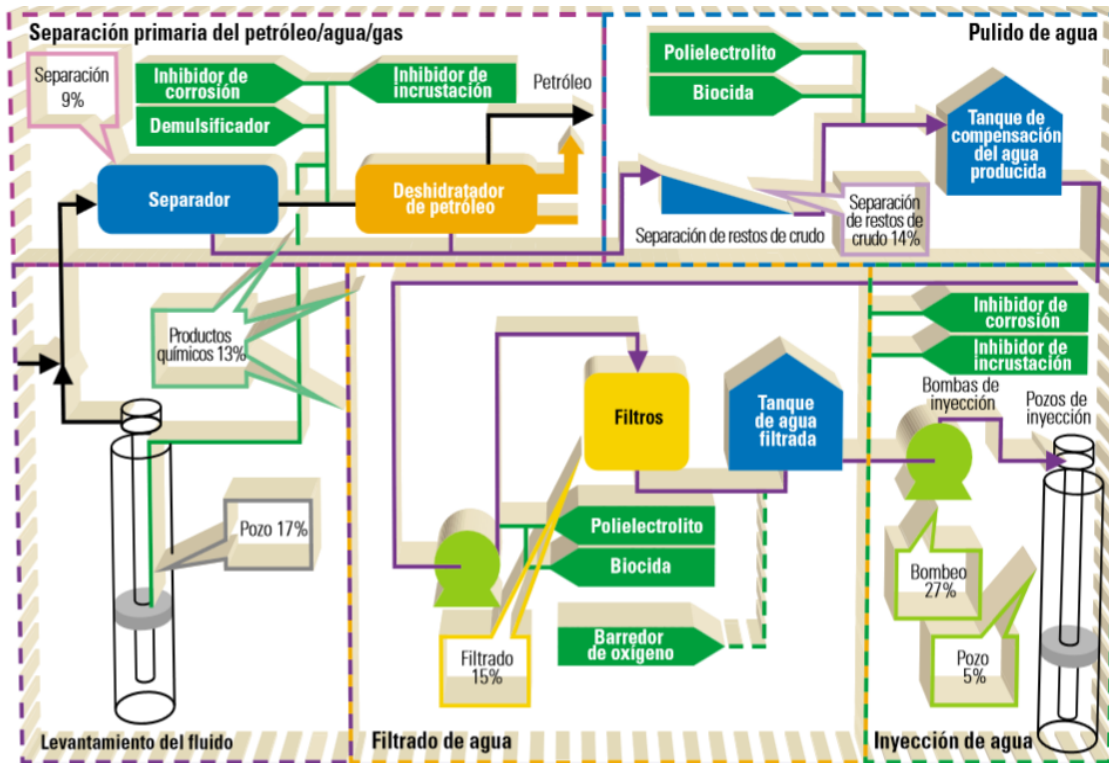


Figura 8. Instalaciones de superficie típicas (Fuente: SPE Oilfield Review, 2010)

Las estimaciones de los costos promedio del manejo del agua es de 50 centavos de dólar por barril, partiendo del supuesto de que los campos se encuentran en tierra, que las profundidades de los pozos tienen entre 1828 a 2438 metros [6000 y 8000 pies] y que producen 100 barriles por día [bpd] e inyectan 5000 [bpd] de agua.

Tabla 4. Porcentaje promedio del manejo de agua (Fuente: SPE Oilfield Review, 2010)

Actividad	Costo [%]
Levantamiento el agua	17
Químicos	13
Remoción y procesamiento	9
Separación de residuos de aceite	14
Filtrado	15
Bombeo	27
Reinyección	5

Por otro lado, los tratamientos químicos incluyen rompedores de emulsiones, bioácidas, polielectrolitos y secuestrantes de oxígeno que se agregan al agua para condicionarla para la reinyección, además de inhibidores de corrosión y químicos para combatir las incrustaciones minerales, que se adicionan principalmente para proteger las tuberías y los equipos de fondo. Cuando el agua comienza a producirse a altas tasas, los aditivos químicos constituyen hasta un 20% de los costos de manejo del agua en superficie. Las instalaciones de superficie y equipos para la inyección representan el 80% restante.

Un factor importante para poder reducir los costos del tratamiento del agua en superficie es la separación parcial del agua y el petróleo realizada en el fondo, estos dispositivos (figura 9) junto con las bombas electrosumergibles, permiten separar hasta el 50% del agua e inyectarla en el fondo, con lo cual se evitan los costos del levantamiento (17%, tabla 4) y separación del agua en la superficie.

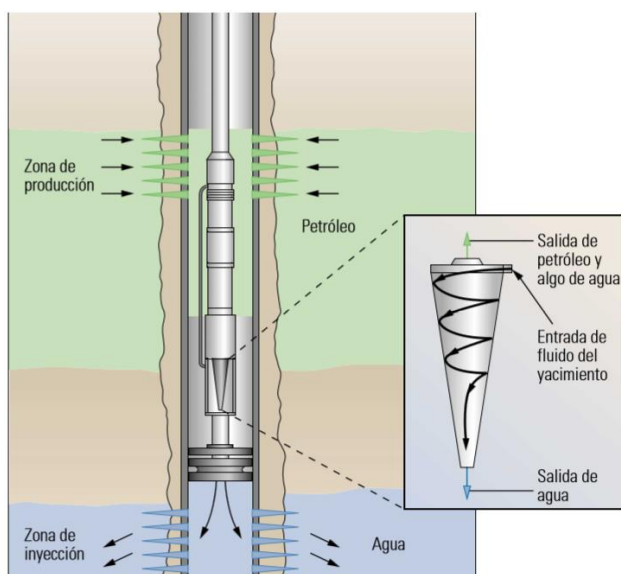


Figura 9. Separador de fondo (Fuente: SPE Oilfield Review, 2010)

Como alternativa a la separación en el fondo y reinyección simultánea, existe la producción segregada en el fondo por la cual el agua y los hidrocarburos son producidos en forma separada, evitando la necesidad de contar con complejas instalaciones de separación en la superficie. Por último, los tratamientos químicos, como los rompedores de emulsiones, los químicos para destruir las incrustaciones minerales y los inhibidores de corrosión inyectados en el fondo pueden separar los fluidos para poder realizar un tratamiento de superficie eficiente.

2.3.1. Métodos de separación del agua

Los requerimientos para el tratamiento de fluidos producidos dependen de su origen, su condición y el método de descarga elegido para la salmuera. 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 e hidrociclones.

2.3.1.1. Separadores

Para los pozos que producen cantidades moderadas de agua, el aceite y el agua pueden separarse del gas en separadores de tres fases. Este tipo de separación es aplicable en donde las caídas de presión en el pozo a través de estranguladores no han emulsionado el agua.

La separación del aceite del agua ocurre inicialmente en una cámara de gravedad con salidas separadas para el aceite y el agua. La descarga del aceite y del agua es controlada por válvulas de flotación individuales.

Estos separadores son útiles para la separación del aceite, agua y gas en bajos volúmenes o para pruebas de pozos individuales en campos con flujos en tres fases.

Los separadores tienen dos puntos de control principales:

1. Control de presión
2. Control de nivel

En un separador de tres fases los flujos de salida son gas y dos líquidos. En el campo petrolero una de las fases líquidas generalmente es agua y la otra generalmente petróleo.

En los recipientes de tres fases hay dos reguladores de nivel, uno para cada fluido. El control de nivel puede ser más difícil puesto que el tiempo de retención de cada fluido puede ser afectado por el regulador de nivel del otro, y los volúmenes de cada fluido pueden cambiar drásticamente con el tiempo.

Separador de agua libre

Un separador de agua libre (FWKO por sus siglas en inglés) es sencillamente un recipiente que proporciona un espacio para que el agua libre se separe de una emulsión. Muchas veces contiene un filtro para quitar partículas de petróleo o emulsión que puedan estar atrapadas en el agua a medida que pasan por el filtro. El agua libre se retira automáticamente del fondo de la unidad, y la emulsión o el petróleo sale por arriba y pasa al sistema de tratamiento. De esta manera, se elimina el agua en estado libre; y sólo la emulsión se trata por el sistema de calefacción o tratamiento.

El agua libre es el agua asociada con el aceite que precipita en cinco minutos cuando los fluidos del pozo se dejan decantar en un tanque de sedimentación. El agua libre no forma parte de la emulsión y puede ser separada fácilmente por la sola fuerza de gravedad.

Existen muchos tipos de separadores de agua libre, desde las unidades de fabricación casera hasta las unidades verticales u horizontales capaces de una operación de dos o tres fases. Un separador de agua libre de dos fases está diseñado de tal manera que solamente el agua libre se separa del aceite o emulsión. Un separador de agua libre de tres fases separa el agua libre y el gas del aceite de la emulsión.

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 coalescedores de placa paralela:

- El interceptor de placa paralela
- Separador de placa inclinada

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

2.3.1.2. Tratadores

Una emulsión es una combinación de dos líquidos no miscibles, o de líquidos que no se mezclan bajo condiciones normales. Uno de los líquidos se extiende o esparce a través del otro en forma de gotitas pequeñas. Estas gotitas pueden ser de todos los tamaños, desde medianamente grandes hasta muy pequeñas. Una emulsión estable es una que no se rompe sin alguna forma de tratamiento. Se requieren tres condiciones para la formación de una emulsión estable:

1. Los líquidos deben ser no miscibles.
2. Debe haber agitación suficiente como para dispersar uno de los líquidos en forma de gotitas dentro del otro.
3. Debe estar presente un agente emulsificador, o emulsificante.

Una emulsión aceite-agua podrá contener desde muy poco hasta 90% de agua. Además, una emulsión puede fuerte (difícil de romper) o floja (fácil de romper). Que una emulsión resulte fuerte o floja depende de varios factores que incluyen las propiedades del aceite y del agua, el porcentaje de cada uno en la emulsión, y el tipo y cantidad de emulsificante presente.

El tratamiento puede hacerse con uno o más de los procesos siguientes:

- Tiempo de residencia
- Calor
- Productos químicos
- Electricidad
- Operar varios dispositivos mecánicos, tales como tanques de decantación, tanques de lavado, deshidratadores mecánicos, etc., y
- Añadir diluyentes para reducir la viscosidad.

Los factores involucrados en el tratamiento de emulsiones de agua en aceite incluyen:

- Romper las películas que rodean a las gotitas de agua y coalescer las gotitas para formar gotas más grandes.
- Dejar que precipiten las gotas de agua durante o después de su coalescencia.

Todas las emulsiones se separan en aceite y agua si se les permite asentar durante un tiempo ilimitado, por lo cual mucha del agua producida con aceite se separa sin la ayuda del calor, productos químicos, u otros recursos. Sin embargo, las partículas pequeñas de agua en las emulsiones de agua en aceite están generalmente rodeadas de una película resistente, cuando es estudiada con el microscopio. Esta película es difícil de romper, y, hasta que se rompe, las gotitas de agua no coalescen. Por lo tanto, el calor, los productos químicos, la electricidad, los dispositivos mecánicos, y varias combinaciones de todos estos factores son generalmente necesarios para que se rompa la película que rodea a las gotas de agua y éstas coalezcan.

Tratamiento térmico

Una emulsión no se separa solamente con calor, excepto en casos poco frecuentes, generalmente la aplicación de calor es un proceso auxiliar para acelerar la separación.

Los calentadores de emulsión pueden ser: directos o indirectos. La mayoría de las plantas de tratamiento no utilizan calentadores independientes; el calentador generalmente forma parte integral de un sistema de tratamiento en el cual se lleva a cabo el calentamiento y el tratamiento.

Un tratador por calentamiento (también llamado tratador de flujo o de emulsión) es un dispositivo que combina todos los componentes necesarios para tratar una emulsión en un sólo recipiente. En el recipiente se aplican los productos químicos, el calor, la sedimentación, y, frecuentemente, la electricidad.

El tratador por calentamiento está diseñado para incluir en una unidad cualquiera o todos de los siguientes elementos: separador de aceite y gas, separador de agua libre, calentador, lavado de agua, sección de filtros, sección de estabilización, intercambiador de calor, y campo electrostático. Existe un gran número de modificaciones del modelo básico de tratadores por calentamiento; es decir, una de las funciones puede ser más importante que otra, dependiendo del servicio para el cual ha sido diseñado. Además, cada modelo puede obtenerse en diversos tamaños para manejar diferentes volúmenes de fluidos de pozo. Algunos tratadores están diseñados para uso en climas excesivamente fríos; otros modelos están diseñados especialmente para tratar aceite espumante. La selección del tratador apropiado para cualquier conjunto de condiciones dadas es una compleja decisión de ingeniería que puede ser tomada solamente luego de conocer una gran cantidad de factores.

Tratamiento Químico

Para que un producto químico pueda actuar como separador de emulsión en una emulsión de agua en aceite, debe poder desactivar al agente emulsificador que rodea a las gotitas

de aguas dispersas. Los productos químicos usados para separar emulsiones de agua en aceite se agregan en cantidades pequeñas en algún punto del tratamiento. Tales productos químicos deben ser solubles en aceite y activos en la superficie (disolverse en el aceite y trabajar sobre las superficies de las gotitas de agua para que se separen). Los productos químicos separadores de emulsión son también materiales polares. Los productos químicos usados para tratar emulsiones inversas, o sea aceite en agua, difieren de los usados para tratar emulsiones de agua en aceite por cuanto éstos son solubles en agua. Al disolverse en el agua el producto químico puede hacer contacto con la superficie de las gotitas de aceite suspendidas en el agua. El producto químico deberá separar al emulsificante que rodea a las gotitas de aceite al entrar en contacto con el mismo y hacer que las gotitas de aceite se adhieran, o coalezcan.

Tratamiento electroestático

Los procesos de deshidratación electrostática consisten en someter la emulsión a un campo eléctrico intenso, generado por la aplicación de un alto voltaje entre dos electrodos. La aplicación del campo eléctrico sobre la emulsión induce a la formación de dipolos eléctricos en las gotas de agua, lo que origina una atracción entre ellas, incrementando su contacto y su posterior coalescencia.

Como efecto final se obtiene un aumento del tamaño de las gotas, lo que permite la sedimentación por gravedad. Un deshidratador electrostático está dividido en 3 secciones. La primera sección ocupa aproximadamente el 50% de su longitud y es llamada "Sección de calentamiento". La segunda sección es llamada "Sección central o control de nivel" y esta ocupa por alrededor del 10% de su longitud ubicada adyacente a la sección de calentamiento. La tercera sección ocupa el 40% de la longitud del deshidratador y es denominada "Sección de asentamiento" del agua suspendida para producir crudo limpio. Las parrillas de electrodos de alto voltaje están localizadas en la parte superior del recipiente, arriba de la interfase agua-aceite.

2.3.2. Separación de contaminantes

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 descargada en el mar están en un promedio de 40 mg/l con una concentración máxima en una muestra de 72 [mg/l] dependiendo de las normas y regulaciones que maneje cada país.

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

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.

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 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 incrustación.

Remoción del Oxígeno

Una vez que el oxígeno se ha introducido en las salmueras, rara vez se extrae. Cuando se debe inyectar el agua, frecuentemente es más económico retirar el oxígeno o usar 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.

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 función de:

- Concentración de Oxígeno Disuelto en el agua
- Relación Gas-Agua
- Presión
- Temperatura

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

En el caso de la desaireación en vacío se 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. 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.

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:

- Aireación satura al agua con aire, causando la liberación del H_2S .
- 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.

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:

- Aireación o barrido mecánico con aire.
- 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 .

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 al mar generalmente se filtran, pues los sólidos no son perjudiciales. Hay varios sistemas de filtro disponibles en el mercado.

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.

Biocidas

Los productos biocidas son aquellos destinados a destruir, neutralizar, impedir la acción o ejercer control de otro tipo sobre cualquier microorganismo dañino por medios químicos o biológicos.

Se deben añadir biocidas, por ejemplo, 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

(0.5 mm 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 mostradas en la Tabla 5.

Tabla 5. Clasificación de bacterias (Fuente: Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de aguas residuales con el proceso de lodos activados).

Bacteria	Característica
Aeróbicas	Requiere oxígeno para vivir
Anaeróbicas	Crecen en la ausencia de oxígeno
Facultativas	Crecen con o sin oxígeno

2.4. Métodos empleados para el desecho o reutilización del agua en la industria petrolera

Existen diversas prácticas en la industria petrolera para desechar el agua asociada a la producción de un campo petrolero, algunas aceptadas otras no tanto.

En teoría, estas prácticas deberán realizarse después de algún tratamiento previo de los antes mencionados, a continuación, se enunciarán algunas de las más comunes en la actualidad.

Descarga 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 lleva a la contaminación de las capas freáticas superficiales y del agua potable y a la acumulación de grandes cantidades de sal en el suelo, haciéndolo infértil.

Descarga 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.

Descarga Controlada en la Superficie

La descarga controlada en la superficie es practicada algunas zonas del mundo. 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 y para cultivos de cierto tipo de plantas resistentes a altos niveles de salinidad.

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 ya que representan una fuente de contaminación muy alta.

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 de petróleo, que generalmente son de difícil acceso. Esto ha llevado a la concentración de metales y aceites pesados en la vida marina y a la contaminación costera.

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

Inyección por el Espacio Anular

Se ha practicado la inyección de agua por el espacio anular de pozos productivos en varios campos. Esencialmente, es lo mismo que la inyección en pozo somero o poco profundo pues el fluido se dirige a la primera zona permeable debajo de la primera tubería de

revestimiento. Además, los controles de la cementación de la primera tubería de revestimiento no se adecuan a la disposición de las aguas, y la tubería de revestimiento se perforó hace algún tiempo y bien podría estar desgastada hasta el punto de falla.

Inyección a pozos receptores

La inyección a los llamados pozos letrina o receptores es una de las operaciones más comunes, que básicamente consiste en darle el tratamiento mínimo al agua de producción y reinyectar al subsuelo con el fin de disminuir y desechar el fluido sobrante en la superficie, esta práctica es muy aceptada: sin embargo, existen riesgos ambientales si se realiza una mala planeación del pozo.

Inyección para Mantenimiento de Presión.

Los fluidos son reinyectados para apoyar la recuperación adicional de petróleo del campo, generalmente para mantener la presión del yacimiento. Comúnmente este procedimiento se realiza cuando la presión comienza a caer o cuando los cortes de agua asociada al petróleo comienzan a ser muy alta.

Capítulo 3. Organismos y normas reguladoras para el uso y tratamiento de aguas residuales

3.1. Antecedentes

La Constitución política de los Estados Unidos Mexicanos actualmente en vigor fue promulgada el 5 de febrero de 1917, en ella se encuentran todas las leyes, reglamentos y normas que rigen a todos los mexicanos.

En ella se hablan de leyes y reglamentos que otorgan derechos y obligaciones a cada mexicano, se consideran de carácter legislativo-legal, su cumplimiento debe ser obligatorio.

Los reglamentos se definen como disposiciones legislativas para desarrollar y hacer explícitas resoluciones legales a las que se llegan. Estos documentos tienen la característica de integridad con las leyes, plantean la forma en que se deben cumplir los principios señalados por éstas.

Las Normas suelen ser de diversas características y debido a ello pueden ser desde recomendables hasta obligatorias dependiendo de la actividad en específico. Mediante éstas se regulan y controlan diversas actividades desempeñadas por los diferentes sectores públicos, privados, comerciales por mencionar algunos.

Las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) son expedidas por dependencias competentes, de observancia nacional y de carácter obligatorio; en cuanto que las Normas Mexicanas (NMX) son de aplicación voluntaria, útiles para determinar la calidad en productos o servicios.

Las Normas Internacionales (NI) son Normas que emite un organismo o dependencia internacional reconocido oficialmente por el país en términos del derecho internacional y las Normas de Referencia (NRF) son elaboradas por entidades de administración pública, cuando no se cubran los requerimientos o sus especificaciones resulten obsoletas y por último los Códigos, Estándares, Prácticas Recomendadas que se deben solicitar ésta o su equivalente cuando no se cuente con la normatividad mexicana o no se encuentre amparada por ninguna ley.

En México, la preocupación por el medio ambiente se inició oficialmente con la publicación, en 1971, de la Ley Federal para Prevenir y Controlar la Contaminación Ambiental (LFPCCA). Esta ley estuvo vigente hasta 1982, cuando se publica la Ley Federal de Protección al Ambiente (LFPA), cuya vigencia se prolongó hasta 1988. Con la publicación

de estas leyes, en el periodo de 1971 a 1988 numerosas industrias incluyeron en su organigrama un área ambiental; sin embargo, las crisis económicas recurrentes pospusieron muchas de las buenas intenciones en materia ambiental y las empresas terminaron por cerrar sus áreas ambientales.

Desde 1992, se ha señalado en la Ley de Aguas Nacionales que su objeto es regular la explotación, uso o aprovechamiento de las aguas nacionales, su distribución y control, así como la preservación de su cantidad y calidad para lograr un desarrollo integral sustentable. Sin embargo, con la reforma hecha en 2004 se generaron muchos problemas que limitan la administración del agua. Algunos de los conceptos que no fueron plenamente instrumentados están relacionados con la variable ambiental, la publicación de la disponibilidad del agua, las vedas, reservas y reglamentos, la clasificación de los cuerpos de agua, el mercado de agua, y los consejos de cuenca y grupos auxiliares

Con la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), publicada en 1988 y sus revisiones en 1996 y 2007, se creó un nuevo impulso al “mercado ambiental”. No obstante, las empresas en general no crearon un área ambiental especial, sino que la abrieron dentro o junto con áreas ya existentes como seguridad o higiene. Desafortunadamente, el personal a cargo del área ambiental con frecuencia no tiene educación formal en el área, lo que ha propiciado que la industria mexicana enfrente de manera recurrente problemas como:

- a) Altos pagos por multas debido al incumplimiento de las Condiciones Particulares de Descarga.
- b) Problemas con las aguas provenientes de la operación de los sistemas de pretratamiento del agua.
- c) Incremento del costo del agua potable y del agua de pozo.
- d) Escasez de agua potable.
- e) El uso y manejo del agua dentro de las empresas es con frecuencia ineficiente. **f)** La operación de sistemas de tratamiento existentes dentro de la empresa deja también mucho que desear.
- f) El reúso del agua residual es incipiente.

Por otro lado, la cantidad de agua congénita o agua producida durante la actividad de explotación de hidrocarburos es, en su gran mayoría, inyectada. En 2004, esta cantidad alcanzó 88.9%. En 2003, se emitió la norma oficial mexicana que establece las especificaciones ambientales para el manejo de agua congénita asociada a hidrocarburos, que establece los límites máximos permisibles de diversos contaminantes para la descarga de agua congénita, así como las características que deben tener los pozos para la reinyección de la misma (SEMARNAT, 2003).

3.2. Organismos reguladores del agua en México

Los principales organismos de que regulan el control, tratamiento y desecho de las aguas asociadas a la producción y aguas residuales son:

- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)
- Procuraduría Federal de Protección Ambiental (PROFEPA)
- Agencia de Seguridad, Energía y Ambiente (ASEA)

3.2.1. SEMARNAT

La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) es la dependencia de gobierno que tiene como propósito fundamental, constituir una política de Estado de protección ambiental, que revierta las tendencias del deterioro ecológico y sienta las bases para un desarrollo sustentable en el país. A través de una visión que busca que exista un país en el que todos abriguen una profunda y sincera preocupación por cuidar y conservar todo cuanto la naturaleza ha dado a nuestra patria, conciliando el genio humano con el frágil equilibrio de los demás seres vivos y su medio ambiente para alcanzar el desarrollo sustentable.

Para cumplir con este mandato, la SEMARNAT, sus tres subsecretarías y los diversos Órganos Desconcentrados y Descentralizados que forman parte del Sector Ambiental Federal, trabajan en cuatro aspectos prioritarios:

- La conservación y aprovechamiento sustentable de los ecosistemas y su biodiversidad.
- La prevención y control de la contaminación.
- La gestión integral de los recursos hídricos.
- El combate al cambio climático.

3.2.2. CONAGUA

La Comisión Nacional del Agua (Conagua) se encarga de administrar y preservar las aguas nacionales y sus bienes inherentes, para lograr su uso sustentable, con la corresponsabilidad de los tres órdenes de gobierno y la sociedad en general.

Como autoridad, es promotor de la participación de la sociedad y de los órdenes de gobierno en la gestión integrada del recurso hídrico y sus bienes públicos inherentes.

Sus principales objetivos y estrategias:

- Promover el manejo integrado y sustentable del agua en cuencas y acuíferos.
- Mejorar el desarrollo técnico, administrativo y financiero del sector hidráulico
- Prevenir los riesgos derivados de fenómenos meteorológicos e hidrometeorológicos y atender sus efectos.
- Evaluar los efectos del cambio climático en el ciclo hidrológico.
- Consolidar la participación de los usuarios y la sociedad organizada en el manejo del agua y promover la cultura de su buen uso.
- Crear una cultura contributiva y de cumplimiento a la Ley de Aguas Nacionales en materia administrativa.

Dentro de las instituciones que le antecedieron destacan la Dirección de Aguas, Tierras y Colonización creada en 1917; la Comisión Nacional de Irrigación, en 1926; la Secretaría de Recursos Hidráulicos en 1946 y la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos en 1976.

3.2.3. PROFEPA

La Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA), es un órgano administrativo desconcentrado de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) con autonomía técnica y operativa. Su nacimiento data del 4 de junio de 1992, fecha en la que el Diario Oficial de la Federación publicó el Reglamento Interior de la Secretaría de Desarrollo Social que la crea. La PROFEPA tiene como tarea principal incrementar los niveles de observancia de la normatividad ambiental, a fin de contribuir al desarrollo sustentable y hacer cumplir las leyes en materia ambiental.

Dentro de sus objetivos estratégicos encontramos:

1. Contener la destrucción de nuestros recursos naturales y revertir los procesos de deterioro ambiental
2. Procurar el pleno acceso de la sociedad a la impartición de una justicia ambiental pronta y expedita.
3. Lograr la participación decidida, informada y responsable de los miembros de la sociedad y de sus organizaciones, en la vigilancia e inducción del cumplimiento de la ley ambiental.
4. Fortalecer la presencia de la Procuraduría y ampliar su cobertura territorial, con criterio federalista.
5. Construir una institución moderna y eficiente, bajo criterios de honestidad, transparencia y confiabilidad, que permitan crear una nueva imagen ante la sociedad.

3.2.4. ASEA

La Agencia de Seguridad, Energía y Ambiente (ASEA) es un nuevo órgano administrativo desconcentrado de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales que regula y supervisa la seguridad industrial, seguridad operativa y protección al ambiente respecto de las actividades del sector hidrocarburos.

ASEA nació el 2 de marzo de 2015, ya que en el artículo 19 transitorio de la Reforma Energética se establecieron las bases para la creación de una agencia gubernamental encargada de regular y supervisar las instalaciones y actividades del sector hidrocarburos en seguridad industrial, operativa y protección al medio ambiente.

Tiene como objetivo garantizar la seguridad de las personas y la integridad del medio ambiente con certidumbre jurídica, procedimental y de costos en el sector hidrocarburos igualmente supervisa en materia de seguridad industrial, operativa y de protección del medio ambiente, las instalaciones y actividades del sector hidrocarburos, incluyendo las actividades de desmantelamiento y abandono de instalaciones, así como el control de residuos.

Este órgano regula las actividades en:

- Producción de crudo y gas

- Actividades en pozos terrestres y marinos
- Regulaciones en centros de venta de combustibles
- Transporte de hidrocarburos
- Terminales de almacenamiento y distribución
- Refinerías

Estos organismos garantizan la protección ambiental aplicando diversos reglamentos y normas donde se especifican los parámetros necesarios para asegurar un correcto procesamiento y desecho de los residuos de las actividades industriales.

3.3. Leyes y normas reguladoras para aguas residuales

Algunas de las leyes y normas principales que rigen la industria petrolera en el tema de las aguas residuales podemos mencionar:

- Ley General de Equilibrio Ecológico
- Ley de Aguas Nacionales
- NOM-001-SEMARNAT-1996
- NOM-143-SEMARNAT-2003

3.3.1. Ley General de Equilibrio Ecológico

Esta ley es publicada en el Diario Oficial de la Federación el 28 de enero de 1988 donde sus principales objetivos se citan en el artículo 1:

ARTÍCULO 1.- La presente Ley es reglamentaria de las disposiciones de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos que se refieren a la preservación y restauración del equilibrio ecológico, así como a la protección al ambiente, en el territorio nacional y las zonas sobre las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción. Sus disposiciones son de orden público e interés social y tienen por objeto propiciar el desarrollo sustentable y establecer las bases para:

- I. Garantizar el derecho de toda persona a vivir en un medio ambiente sano para su desarrollo, salud y bienestar
- II. Definir los principios de la política ambiental y los instrumentos para su aplicación;
- III. La preservación, la restauración y el mejoramiento del ambiente;
- IV. La preservación y protección de la biodiversidad, así como el establecimiento y administración de las áreas naturales protegidas;
- V. El aprovechamiento sustentable, la preservación y, en su caso, la restauración del suelo, el agua y los demás recursos naturales, de manera que sean compatibles la obtención de beneficios económicos y las actividades de la sociedad con la preservación de los ecosistemas;
- VI. La prevención y el control de la contaminación del aire, agua y suelo;
- VII. Garantizar la participación corresponsable de las personas, en forma individual o colectiva, en la preservación y restauración del equilibrio ecológico y la protección al ambiente;
- VIII. El ejercicio de las atribuciones que en materia ambiental corresponde a la Federación, los Estados, el Distrito Federal y los Municipios, bajo el principio de concurrencia previsto en el artículo 73 fracción XXIX - G de la Constitución;
- IX. El establecimiento de los mecanismos de coordinación, inducción y concertación entre autoridades, entre éstas y los sectores social y privado, así como con personas y grupos sociales, en materia ambiental, y
- X. El establecimiento de medidas de control y de seguridad para garantizar el cumplimiento y la aplicación de esta Ley y de las disposiciones que de ella se deriven, así como para la imposición de las sanciones administrativas y penales que correspondan. En todo lo no previsto en la presente Ley, se aplicarán las disposiciones contenidas en otras leyes relacionadas con las materias que regula este ordenamiento.

Dentro de esta ley se encuentra un capítulo que es importante mencionar en esta investigación, se trata del Capítulo 3 compuesta por diez y ocho artículos, únicamente se hará referencia a los más importantes en cuestión de control y tratamiento de aguas residuales:

ARTÍCULO 117.- Para la prevención y control de la contaminación del agua se considerarán los siguientes criterios:

- I. La prevención y control de la contaminación del agua, es fundamental para evitar que se reduzca su disponibilidad y para proteger los ecosistemas del país;
- II. Corresponde al Estado y la sociedad prevenir la contaminación de ríos, cuencas, vasos, aguas marinas y demás depósitos y corrientes de agua, incluyendo las aguas del subsuelo;

- III. El aprovechamiento del agua en actividades productivas susceptibles de producir su contaminación, conlleva la responsabilidad del tratamiento de las descargas, para reintegrarla en condiciones adecuadas para su utilización en otras actividades y para mantener el equilibrio de los ecosistemas;
- IV. Las aguas residuales de origen urbano deben recibir tratamiento previo a su descarga en ríos, cuencas, vasos, aguas marinas y demás depósitos o corrientes de agua, incluyendo las aguas del subsuelo; y
- V. La participación y corresponsabilidad de la sociedad es condición indispensable para evitar la contaminación del agua.

ARTÍCULO 118.- Los criterios para la prevención y control de la contaminación del agua serán considerados en:

- I. La expedición de normas oficiales mexicanas para el uso, tratamiento y disposición de aguas residuales, para evitar riesgos y daños a la salud pública;
- II. La formulación de las normas oficiales mexicanas que deberá satisfacer el tratamiento del agua para el uso y consumo humano, así como para la infiltración y descarga de aguas residuales en cuerpos receptores considerados aguas nacionales; Fracción reformada DOF 13-12-1996
- III. Los convenios que celebre el Ejecutivo Federal para entrega de agua en bloque a los sistemas usuarios o a usuarios, especialmente en lo que se refiere a la determinación de los sistemas de tratamiento de aguas residuales que deban instalarse;
- IV. El establecimiento de zonas reglamentadas, de veda o de reserva en términos de la Ley de Aguas Nacionales; Fracción reformada DOF 13-12-1996
- V. Las concesiones, asignaciones, permisos y en general autorizaciones que deban obtener los concesionarios, asignatarios o permisionarios, y en general los usuarios de las aguas propiedad de la nación, para infiltrar aguas residuales en los terrenos, o para descargarlas en otros cuerpos receptores distintos de los alcantarillados de las poblaciones; y
- VI. La organización, dirección y reglamentación de los trabajos de hidrología en cuencas, cauces y álveos de aguas nacionales, superficiales y subterráneos.
- VII. La clasificación de cuerpos receptores de descarga de aguas residuales, de acuerdo a su capacidad de asimilación o dilución y la carga contaminante que éstos puedan recibir

ARTÍCULO 119.- La Secretaría expedirá las normas oficiales mexicanas que se requieran para prevenir y controlar la contaminación de las aguas nacionales, conforme a lo dispuesto en esta Ley, en la Ley de Aguas Nacionales, su Reglamento y las demás disposiciones que resulten aplicables.

ARTÍCULO 120.- Para evitar la contaminación del agua, quedan sujetos a regulación federal o local:

- I. Las descargas de origen industrial;
- II. Las descargas de origen municipal y su mezcla incontrolada con otras descargas;
- III. Las descargas derivadas de actividades agropecuarias;
- IV. Las descargas de desechos, sustancias o residuos generados en las actividades de extracción de recursos no renovables;
- V. La aplicación de plaguicidas, fertilizantes y sustancias tóxicas;
- VI. Las infiltraciones que afecten los mantos acuíferos; y
- VII. VII.- El vertimiento de residuos sólidos, materiales peligrosos y lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales, en cuerpos y corrientes de agua.

ARTÍCULO 123.- Todas las descargas en las redes colectoras, ríos, acuíferos, cuencas, cauces, vasos, aguas marinas y demás depósitos o corrientes de agua y los derrames de aguas residuales en los suelos o su infiltración en terrenos, deberán satisfacer las normas oficiales mexicanas que para tal efecto se expidan, y en su caso, las condiciones particulares de descarga que determine la Secretaría o las autoridades locales. Corresponderá a quien genere dichas descargas, realizar el tratamiento previo requerido.

3.3.2. Ley de Aguas Nacionales

La Ley de Aguas Nacionales fue publicada en el Diario Oficial de la Federación el 1º de diciembre de 1992 es reglamentaria del Artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos en materia de aguas nacionales; es de observancia general en todo el territorio nacional, sus disposiciones son de orden público e interés social y tiene por objeto regular la explotación, uso o aprovechamiento de dichas aguas, su distribución y control, así como la preservación de su cantidad y calidad para lograr su desarrollo integral sustentable. En la cual se derogan las responsabilidades de los organismos reguladores del agua, la SEMARNAT y la CONAGUA enunciado en el Título Segundo Capítulo II y III respectivamente.

Dentro del Título Séptimo de esta Ley se encuentra la prevención y control de la contaminación del agua, así como la responsabilidad por daño ambiental.

3.3.3. NOM-001-SEMARNAT-1996

Norma oficial mexicana que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, con el objeto de proteger su calidad y posibilitar sus usos, y es de observancia obligatoria para los responsables de dichas descargas.

Para entrar en contexto con esta norma se consideran los siguientes parámetros:

- *Límite máximo permisible*: valor o rango asignado a un parámetro, el cual no debe ser excedido en la descarga de aguas residuales.
- *Condiciones particulares de descarga*: conjunto de parámetros físicos, químicos y biológicos y de sus niveles máximos permitidos en las descargas de agua residual, determinados por la Comisión Nacional del Agua para el responsable o grupo de responsables de la descarga o para un cuerpo receptor específico, con el fin de preservar y controlar la calidad de las aguas conforme a la Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento.
- *Contaminantes básicos*: Son aquellos compuestos y parámetros que se presentan en las descargas de aguas residuales y que pueden ser removidos o estabilizados mediante tratamientos convencionales.

En lo que corresponde a esta Norma Oficial Mexicana sólo se consideran como contaminantes básicos:

1. Grasas y aceites
2. Materia flotante
3. Sólidos sedimentables
4. Sólidos suspendidos totales
5. Demanda bioquímica de oxígeno
6. Nitrógeno total (suma de las concentraciones de nitrógeno Kjeldahl, de nitritos y de nitratos, expresadas como mg/litro de nitrógeno)
7. Fósforo total
8. Temperatura
9. pH

Los límites máximos permisibles (Tablas 6 y 7) que se especifican en esta norma consideran cuatro zonas de descarga de aguas residuales:

1. Ríos
2. Ensamblados naturales y artificiales
3. Aguas costeras
4. Suelo

La concentración de contaminantes básicos, metales pesados y cianuros para las descargas de aguas residuales a aguas y bienes nacionales, no debe exceder el valor indicado como límite máximo permisible en esta Norma Oficial Mexicana. El rango permisible del potencial hidrógeno (pH) es de 5 a 10 unidades.

En este estudio únicamente nos concentraremos a los cuerpos 3 y 4 (Aguas costeras y suelo, respectivamente).

Tabla 6. Límites máximos permisibles en aguas costeras (Fuente: NOM-001-SEMARNAT-1996)

Límites máximos permisibles para contaminantes básicos						
Parámetro	Aguas costeras					
Miligramo por litro excepto cuando se especifique	Explotación pesquera, navegación y otros usos (A)		Recreación (B)		Estuarios (B)	
	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.
Temperatura (°C)	40	40	40	40	40	40
Grasas y Aceites	15	25	15	25	15	25
Materia flotante	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Sólidos Sedimentables (ml/l)	1	2	1	2	1	2
Sólidos Suspendidos Totales	150	200	75	125	75	125
Demanda Bioquímica de Oxígeno	150	200	75	150	75	150
Nitrógeno Total	N.A.	N.A.	15	25	15	25
Fósforo Total	N.A.	N.A.	5	10	5	10

P.d.= Promedio diario; P.M.= Promedio Mensual; N.A.= no es aplicable
 (A), (B) y (C): tipo de Cuerpo Receptor según la Ley Federal de derechos

Tabla 7. Límites máximos permisibles en suelos (Fuente: NOM-001-SEMARNAT-1996)

Límites máximos permisibles para contaminantes básicos				
Parámetro	Suelos			
	Uso en riego agrícola (A)		Humedales naturales (B)	
Miligramo por litro excepto cuando se especifique	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.
Temperatura (°C)	N.A.	N.A.	40	40
Grasas y Aceites	15	25	15	25
Materia flotante	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Sólidos Sedimentables (ml/l)	N.A.	N.A.	1	2
Sólidos Suspendidos Totales	N.A.	N.A.	75	125
Demanda Bioquímica de Oxígeno	N.A.	N.A.	75	150
Nitrógeno Total	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
Fosforo Total	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.

3.3.4. NOM-143-SEMARNAT-2003

El agua congénita o de formación tiene concentración de diversos componentes que puede ocasionar impactos negativos al medio ambiente cuando su manejo y disposición no son adecuados.

Los riesgos ambientales que se presentan en el manejo y disposición del agua congénita son:

- La eventual contaminación de acuíferos en el proceso de inyección a formaciones receptoras,
- La contaminación de cuerpos receptores si no se cuenta con parámetros de limpieza
- Contaminación del suelo cuando se producen derrames accidentales en su transporte.

Es por ello que se crea la Norma Oficial Mexicana 143 de la SEMARNAT en donde tiene como objetivo:

Establecer especificaciones en materia ambiental para el manejo e inyección en formaciones receptoras, del agua congénita que se asocia a hidrocarburos y los límites máximos permisibles de los parámetros para su descarga a cuerpos en todo el territorio nacional y en las zonas marinas mexicanas.

En la norma se encuentran un conjunto de especificaciones para correcto manejo, tratamiento, usos y almacenamiento del agua congénita asociada a los hidrocarburos que se citan a continuación:

- Manejo del agua congénita: el agua congénita asociada a los hidrocarburos debe ser dispuesta en cuerpos receptores o en formaciones receptoras en el subsuelo.
- En caso de presentarse derrames o infiltraciones al suelo durante el manejo del agua congénita debe atenderse a lo dispuesto en la normatividad vigente en materia de restauración de suelos y saneamiento de acuíferos.
- Separación
- Durante los procesos de separación de hidrocarburos y agua congénita se deben evitar derrames o infiltraciones al suelo.
- Almacenamiento temporal: las presas para almacenamiento temporal del agua congénita deben evitar filtraciones al suelo; para ello, deben construirse sobre una capa de arcilla, con un espesor, grado de compactación y humedad del material para obtener un coeficiente de permeabilidad (1×10^{-7} [cm/seg] o bien sobre un material sintético equivalente en su permeabilidad.
- Los contenedores para almacenamiento temporal de agua congénita deben contar con diques para la contención de derrames o fugas, con capacidad igual o superior al volumen del contenedor.
- Transporte
- El transporte de agua congénita que contenga 15% o más condensados se hará en contenedores cisterna.
- El porcentaje de condensados en el agua congénita se determinará mediante medidores de fases y de volúmenes.
- Para el transporte de agua congénita en contenedores cisterna se debe llevar una bitácora o registros que permitan dar seguimiento a los volúmenes transferidos entre instalaciones.
- Caracterización
- La caracterización del agua congénita se realizará con los métodos establecidos en el Anexo 1 y 2 y con los establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996, para caracterizar los contaminantes básicos y metales pesados referenciados en la misma, cuando se descargue el agua congénita en cuerpos receptores.

- Límites máximos permisibles de parámetros para la descarga del agua congénita a un cuerpo receptor.
- El límite máximo permisible de hidrocarburos para la descarga de agua congénita en cuerpos receptores de agua dulce es de 15 mg/l, y en aguas costeras y zonas marinas es de 40 mg/l.
- El límite máximo permisible de sólidos disueltos totales (SDT) para la descarga de agua congénita en cuerpos receptores de agua dulce es de 500 mg/l.
- El límite máximo permisible de sólidos disueltos totales (SDT) para la descarga de agua congénita en aguas costeras es de 32,000 mg/l, y su descarga debe ser a una distancia que sobrepase los 2 km mar adentro. Cuando las concentraciones de sólidos disueltos totales sobrepasen las del cuerpo al que se descarga, su descarga se tiene que efectuar través de difusores que permitan la dispersión y asimilación inmediata.
- Características de los pozos para la inyección de agua congénita
- La inyección de agua congénita sólo podrá realizarse toda vez que en su manejo no se incorporen sustancias diferentes a los desincrustantes, inhibidores de corrosión y secuestrantes de oxígeno, desemulsificantes, biocidas y en general, las sustancias necesarias para proteger el pozo y realizar un manejo seguro de dicha agua congénita. Cuando se le añadan sustancias adicionales al agua congénita a inyectar, ésta debe tratarse para restaurarle sus características previas a la adición de dichas sustancias.
- Especificaciones sobre la separación de agua congénita en el interior del pozo en producción.
- Disposición de sólidos separados del agua congénita
- Los lodos resultantes del tratamiento del agua congénita deben manejarse conforme a la normatividad aplicable.
- Cuando el agua congénita se descargue a cuerpos receptores, se deben llevar a cabo monitoreos semestrales de las descargas.

Capítulo 4. Tratamientos disponibles para la reducción de contaminantes en el agua para la factibilidad de su aprovechamiento

Para que el agua pueda ser apta para el uso en actividades humanas, el agua requiere de una serie de tratamientos que se establecen de acuerdo a su calidad inicial.

El tratamiento de aguas y las plantas de tratamiento de agua son un conjunto de sistemas y operaciones unitarias de tipo físico, químico o biológico cuya finalidad es eliminar o reducir la contaminación o las características no deseables de las aguas de acuerdo a su destino final.

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.

La fuente de abastecimiento en este caso (resultado de la explotación petrolera) conlleva a tener altos niveles de salinidad, materia orgánica e inorgánica en el agua, lo que indicará las dificultades que tendrán que enfrentarse para hacerla utilizable y las complejidades de los tratamientos que se deberán aplicar para convertirla en una fuente de riego.

El primer paso para tratar el agua es determinar la calidad inicial del agua en la fuente de abastecimiento, lo que permitirá diseñar el tratamiento necesario. Es común que el agua asociada a la producción de hidrocarburos contenga metales, materia orgánica disuelta o suspendida, color y olor desagradables, aceite, bacterias, virus, parásitos y otros microorganismos, grandes cantidades de calcio y magnesio, hierro y manganeso, carbonatos, bicarbonatos, cloruros o sulfatos en exceso, sustancias orgánicas de toxicidad elevada entre otros contaminantes.

Existen tratamientos físicos, químicos, biológicos y combinaciones entre ellos para la potabilización. Todos los tratamientos tienen limitaciones y tanto sus ventajas y desventajas son los que definen sus campos de aplicación. En este capítulo se presentan aquellos tratamientos que pueden emplearse para la eliminación de los contaminantes presentes en el agua.

En la Tabla 8 se muestra una clasificación convencional del proceso de tratamiento de aguas residuales. El tratamiento primario se emplea para para la eliminación de los sólidos

en suspensión y los materiales flotantes. El tratamiento secundario comprende tratamientos biológicos convencionales. Mientras que el terciario comprende las operaciones más avanzadas para la eliminación de material disuelto que no pudo ser removido en los procesos anteriores.

Tabla 8 Clasificación convencional de tratamientos de aguas residuales (Fuente: Tratamiento de aguas residuales, R. S. Ramalho)

Tratamiento Primario	Tratamiento Secundario	Tratamiento terciario
Cribado o desbrozo	Lodos activados	Microtamizado
Sedimentación	Estabilización por lagunaje	Filtración
Flotación	Filtros biológicos	Coagulación y floculación
Separación de aceites	Discos biológicos	Adsorción
Homogeneización	Clarificador secundario	Intercambio iónico
Neutralización		Osmosis inversa
Control del pH		Electrodiálisis
		Desinfección

Las cuatro fuentes fundamentales de aguas residuales son:

1. Aguas domésticas o urbanas
2. Aguas residuales industriales (donde encontramos a todas las aguas resultado de las operaciones petroleras).
3. Procesos agrícolas
4. Fluviales

4.1. Pretratamientos y tratamientos primarios

La selección de procesos de tratamiento de aguas residuales o la serie de procesos depende de un numero de factores, entre los que se encuentran:

- a) Características del agua residual.
- b) Calidad del efluente requerido (dependiendo del uso o destino)
- c) Coste y disponibilidad de los terrenos en los proyectos.
- d) Consideración de las futuras ampliaciones o la precisión de límites de calidad de vertido más estrictos, que consiste en el diseño de tratamientos más sofisticados en el futuro.
- e) Coste local del agua.

Los pretratamientos de aguas residuales implican la reducción de sólidos en suspensión o el acondicionamiento de las aguas residuales para su descarga o bien para pasar a un tratamiento secundario a través de la neutralización u homogeneización.

Los procesos primarios son los más sencillos ya que su principal objetivo es limpiar al agua de los elementos que puedan obstruir o dificultar los procesos posteriores.

4.1.1. Cribado o mallas

El cribado, también llamado desbrozo, se emplea para la reducción de sólidos en suspensión de diversos tamaños. La distancia o apertura de las rejillas depende de los objetos de la misma, y su limpieza se hace manual (Figura 10) o mecánicamente (Figura 11). Los residuos obtenidos se destruyen por incineración, o se tratan en procesos de digestión anaerobia, o bien se dirigen directamente a un vertedero. La materia se clasifica comúnmente en gruesos y finos.

Las rejillas de finos tienen aberturas de 5 milímetros o menos, mientras que las de gruesos oscilan entre los 4, 8 o 9 centímetros. Generalmente construidas de acero. Aunque puede llegar a eliminar entre un 5 y 25% de los sólidos en suspensión, de un 40 a un 60% se eliminan por sedimentación. Existen diversos tipos de diseños que se adaptan acorde de los requerimientos o nivel de sólidos que se tengan asociados.



Figura 10. Equipo de limpieza manual (Fuente: Operación y Mantenimiento de Plantas de Tratamiento de Aguas, CONAGUA).



Figura 11. Equipo de limpieza automático (Fuente: Operación y Mantenimiento de Plantas de Tratamiento de Aguas, CONAGUA).

4.1.2. Sedimentación

La sedimentación se utiliza en los tratamientos de aguas residuales para separar sólidos en suspensión de las mismas. La eliminación de las materias por sedimentación se basa en la diferencia de peso específico entre las partículas sólidas y el líquido donde se encuentran, que acaba en el depósito de las materias en suspensión. En algunos casos, la sedimentación es el único tratamiento al que se somete el agua residual.

La sedimentación primaria, reduce la carga orgánica en los procesos de tratamiento de aguas mediante la eliminación de una gran cantidad de sólidos suspendidos, y materiales flotantes del afluente del agua residual. Cuando se opera de manera eficiente la sedimentación primaria, típicamente puede remover hasta el 90% de los sólidos sedimentables, del 40 al 60% de los sólidos en suspensión y del 20 al 40% de la demanda bioquímica de oxígeno entrante al sedimentador. El porcentaje de estos componentes retirados en su planta puede ser diferente ya que cada planta es única y sus aguas tienen características particulares que pueden influir en las eficiencias mencionadas.



Figura 12. . Sedimentador primario rectangular (Fuente: Operación y Mantenimiento de Plantas de Tratamiento de Aguas, CONAGUA).

En una planta de tratamiento convencional de aguas residuales, el tratamiento primario por lo general sigue alguna o todas las operaciones unitarias conocidas como pretratamiento. Algunas plantas pueden también ofrecer preaireación antes del tratamiento primario para mejorar la eliminación de arenillas, refrescar el agua residual, eliminar los gases, aumentar la flotación de la grasa, añadir oxígeno disuelto o mejorar la coagulación. El tratamiento primario, reduce la velocidad de las aguas residuales a través de un sedimentador de modo que puede tener lugar la sedimentación y flotación. Esta desaceleración del flujo mejora la eliminación de los sólidos en suspensión en las aguas residuales. Estos sedimentadores o tanques es donde el tratamiento primario se lleva a cabo. Los tanques de sedimentación primaria eliminan la grasa y aceites flotantes, eliminan los sólidos como lodos asentados y los recoge para la transferencia por bombeo hasta su tratamiento. La sedimentación primaria también puede servir como una forma de dilución o como homogenizador de flujo.

Pueden considerarse tres tipos de mecanismos o procesos de sedimentación, dependiendo de la naturaleza de los sólidos presentes en suspensión.

1. Sedimentación discreta: las partículas que se depositan mantienen su individualidad, o sea, no se somete a un proceso de coalescencia con otras partículas. En este caso, las propiedades físicas de las partículas (tamaño, forma,

- peso específico) no cambian durante el proceso. La deposición de partículas de arena en los desarenadores es un ejemplo típico de sedimentación discreta.
2. Sedimentación con floculación: la aglomeración de las partículas va acompañada de cambios en la densidad y en la velocidad de sedimentación o precipitación. La sedimentación que se lleva a cabo en los clarificadores o sedimentadores primarios es un ejemplo de este proceso.
 3. Sedimentación por zonas: las partículas forman una especie de manta que sedimenta como una masa total presentando una interfase distinta con la fase líquida. Un ejemplo de este proceso incluye la sedimentación de lodos activos en los clarificadores secundarios en los procesos de tratamientos de aguas.

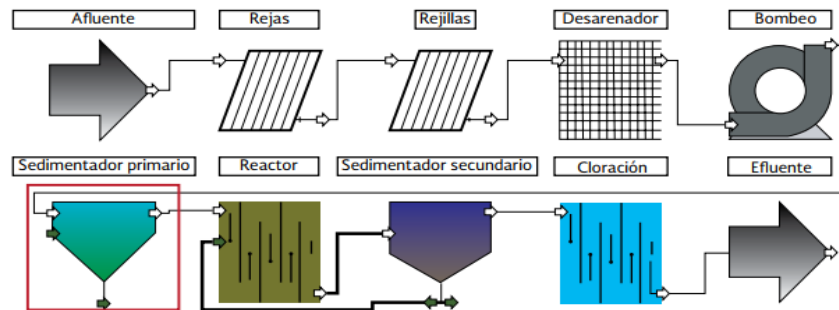


Figura 13. Ubicación de los sedimentadores en un diagrama de proceso (Fuente: Operación y Mantenimiento de Plantas de Tratamiento de Aguas, CONAGUA).

4.1.3. Flotación

La flotación es un proceso para separar sólidos de baja densidad o partículas líquidas como aceites o grasas de una fase líquida. La separación se lleva a cabo introduciendo un gas (normalmente aire) en la fase líquida, en forma de burbujas. La fase líquida se somete a un proceso de presurización para alcanzar una presión de funcionamiento que oscila entre 2 y 4 atm., en presencia del suficiente aire para conseguir la saturación en aire del agua. Luego, este líquido saturado de aire se somete a un proceso de despresurización llevándolo hasta la presión atmosférica por paso a través de una válvula reductora de presión. En esta situación, y debido a la despresurización se forman pequeñas burbujas de aire que se desprenden de la solución. Los sólidos en suspensión o las partículas líquidas (por ejemplo, aceites o petróleo) flotan, debido a que estas pequeñas burbujas, asociándose a los mismos, les obligan a elevarse hacia la superficie. Los sólidos en suspensión concentrados pueden separarse de la superficie por sistemas mecánicos.



Figura 14. Sistema de flotación en funcionamiento (Fuente: Operación y Mantenimiento de Plantas de Tratamiento de Aguas, CONAGUA).

En el campo de los tratamientos de aguas residuales, la flotación se usa para los siguientes objetivos:

1. Separación de grasas, aceites, fibras, y otros sólidos de baja densidad, de las aguas residuales.
2. Espesado de los lodos procedentes de los procesos de lodos activos.
3. El espesamiento de los lodos floculados químicamente resultantes de los tratamientos de coagulación química.

Una superior calidad de los efluentes (efluentes conteniendo porcentajes menores de sólidos en suspensión), y una mayor eficiencia de energía pueden conseguirse con sistemas por flotación con reciclaje.

Los componentes básicos de un sistema de flotación son:

- a) Bomba de presurización
- b) Sistema para inyección de aire
- c) Tanque de retención (para conseguir un contacto aire-líquido)
- d) Válvula reductora de presión
- e) Tanque de flotación



Figura 15. Sistema de flotación (Fuente: Operación y Mantenimiento de Plantas de Tratamiento de Aguas, CONAGUA).

4.1.4. Neutralización

El tratamiento de neutralización se utiliza normalmente en los siguientes casos que se presentan en la depuración de aguas residuales:

1. Antes de la descarga de aguas residuales en un medio receptor. La justificación para la neutralización es que la vida acuática es muy sensible a variaciones de pH (cerca a $\text{pH} = 7$)
2. Antes de la descarga de aguas residuales industriales al alcantarillado municipal. La especificación del pH de las descargas industriales en las alcantarillas se hace de forma frecuente. Es más económico hacer una neutralización de las corrientes de aguas residuales industriales antes de descargar en el alcantarillado municipal, que intentar hacer una neutralización de los mayores volúmenes de las aguas residuales mixtas combinadas domésticas e industriales.
3. Antes del tratamiento químico o biológico. Para los tratamientos biológicos, el pH del sistema se mantiene en un intervalo comprendido entre 6.5 y 8.5 para asegurar una actividad biológica óptima. El proceso biológico en sí mismo puede conseguir una neutralización y en cualquier caso tiene una capacidad tampón como resultado de la producción de CO_2 , que da lugar a la formación de carbonatos y bicarbonatos en la solución.

4.1.5. Homogeneización

La homogeneización significa la mezcla de las corrientes de aguas residuales, ácidas y alcalinas en un tanque de homogeneización. La homogeneización se utiliza a menudo para otros objetivos aparte de la neutralización, como son:

- 1) Aminorar las variaciones de ciertas corrientes de aguas residuales, intentando conseguir una corriente mezclada, con un gasto relativamente constante, que sea el que llegue a la planta de tratamiento
- 2) Aminorar las variaciones de la DBO del afluente a los sistemas de tratamiento. Con este propósito se utilizan tanques de homogeneización de nivel constante o variable.

4.2. Tratamientos secundarios

El tratamiento secundario se utiliza para eliminar los desechos o sustancias que, con la sedimentación o tratamientos primarios no se eliminaron, comprende todos los procesos de tratamiento biológico y químicos de las aguas residuales tanto aerobios como anaerobios.

Los tratamientos biológicos se basan en la utilización de microorganismos capaces de asimilar las sustancias en suspensión o disueltas presentes en el agua residual, a fin de que las bacterias aerobias digieran la materia orgánica presente en las aguas. Con un control adecuado de las condiciones ambientales (presencia o ausencia de oxígeno, pH óptimo, temperatura y mezcla) es posible conseguir el desarrollo de una biomasa capaz de depurar el agua residual hasta alcanzar el grado de tratamiento deseado.

El objetivo del tratamiento secundario en aguas residuales industriales es remover o reducir la concentración de compuestos orgánicos e inorgánicos. Debido a que muchos constituyentes o compuestos que se encuentran en el agua residual industrial son tóxicos para los microorganismos, se requieren de ciertos tratamientos adicionales antes de que el agua industrial sea descargada a algún sistema de colección de agua municipal. Para uso de agua residual en la irrigación agrícola, el objetivo del tratamiento es remover nutrientes, específicamente nitrógeno y fósforo, ya que estos dos compuestos son capaces de estimular el crecimiento de plantas acuáticas, mecanismo llamado eutrofización.

La Eutrofización es el proceso de enriquecimiento del agua por nutrientes, especialmente compuestos de nitrógeno y fósforo que aceleran el crecimiento excesivo de algas y otras plantas acuáticas, las cuales al morir se depositan en el fondo de los cuerpos de agua receptores, generando residuos orgánicos que, al descomponerse, consumen gran parte del oxígeno disuelto y de esta manera pueden afectar a la vida acuática y producir la muerte por asfixia de la fauna y flora.

4.2.1. Tratamiento de lodos activados

Los lodos activados son un proceso biológico de tratamiento de aguas residuales, que se utiliza microorganismos para llevar a cabo la descomposición de los residuos. Al combinarse con la agitación constante de aire estos organismos crecen y se agrupan formando flóculos que a su vez forman una masa microbiana llamada “lodo activado”.

El término “activado” se refiere a la capacidad de este lodo para metabolizar la materia orgánica soluble al dióxido de carbono y agua.

Este tratamiento implica generalmente dos etapas:

1. Aireación (consiste en formar los flóculos)
2. Separación (decantación)

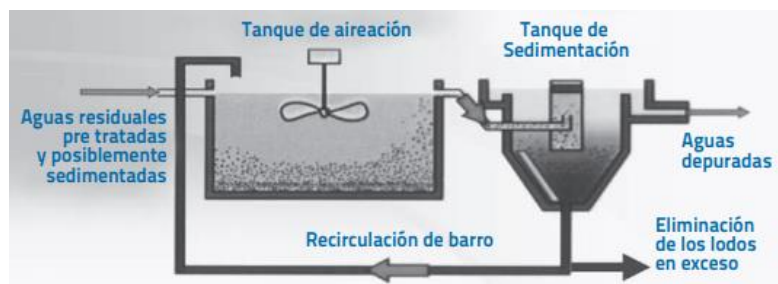


Figura 16. Tratamiento con lodos activados (Fuente: Tratamiento de aguas residuales con lodos activados, Joseph Charpentier).

Etapa de aireación

Un tanque de aireación es equipado de aireadores para suministrar el oxígeno a las bacterias que colonizan la biomasa. Los dos procesos más extendidos para suministrar el

aire son por una parte los aireadores de superficie y por otra parte los difusores de aire dispuestos sobre el fondo del tanque.

La aireación de las aguas residuales que residen en el tanque de aireación genera la formación de flóculos.

El buen funcionamiento de la etapa aireación consiste en un equilibrio entre 3 elementos:

1. La cantidad de materia orgánica que constituyen la contaminación
2. La cantidad de bacterias que son la base de la biomasa
3. La cantidad de oxígeno necesaria para las bacterias con el fin de asimilar las materias orgánicas

Etapa de decantación

La separación de los lodos activados (la biomasa) se realiza por gravitación en un tanque, más a menudo de diseño cilíndrico. Las condiciones de distribución en el decantador de la biomasa que viene del tanque de aireación y de su reanudación en el fondo del decantador son puntos importantes del diseño.

La recuperación del agua depurada en la superficie es un punto también importante que requiere una pantalla delante del vertedero y un barredor de superficie para eliminar las flotantes.

En la figura 17 se muestra el resultado que se debe obtener durante el tratamiento con lodos activados. Las aguas residuales que se le eliminaron la mayoría de los compuestos carbonosos, nitrógenos y fosforados, pueden ser vertidas en la red hidráulica natural sin molestia para el medio ambiente.

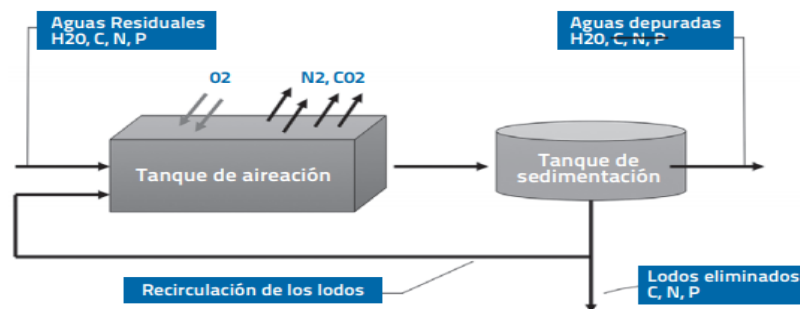


Figura 17. Proceso de eliminación de contaminantes con lodos activados (Fuente: Tratamiento de aguas residuales con lodos activados, Joseph Charpentier).

4.2.2. Sistema filtro precolador

Estos sistemas proporcionan un tratamiento biológico, cuenta con un filtro precolador que se distribuye de forma continua. El tratamiento se produce con el flujo de líquido sobre el biofiltro.

Un Filtro Percolador es un filtro biológico de lecho fijo que opera bajo condiciones principalmente aeróbicas. Se "deja caer" o rocía agua de desecho decantada sobre el filtro. Al migrar el agua por los poros del filtro, la materia orgánica se degrada por la biomasa que cubre el material del filtro.

Los lechos filtrantes suelen ser circulares; el líquido se distribuye en la parte superior de la cama por un distribuidor rotativo.

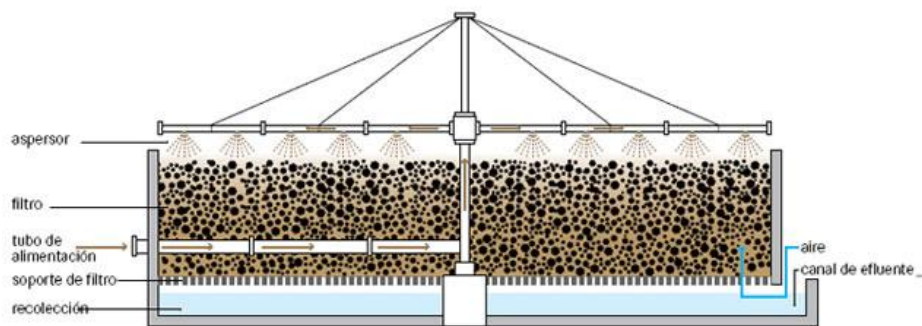


Figura 18. Sistema de filtro precolador.

El filtro percolador se llena con materiales tales como piedras, grava, botellas de PVC trituradas, o material filtrante preformado especialmente. El agua residual pretratada se hace pasar sobre la superficie del filtro. Los organismos que se desarrollan en una delgada capa en la superficie del material, oxidan la carga orgánica produciendo dióxido de carbono y agua, generando nueva biomasa.

El agua residual entrante es rociada sobre el filtro con el uso de un rociador rotatorio. De esta manera, el material del filtro pasa por ciclos de saturación y de exposición al aire. Sin embargo, el oxígeno se reduce en la biomasa y las capas más internas pueden ser anaeróbicas.

Ambos extremos del filtro están ventilados para permitir que el oxígeno pase a lo largo de su superficie. Una losa perforada sostiene el fondo del filtro y permite que el efluente y el exceso de lodo se recolecten.

Con el tiempo la biomasa engrosará y la capa sujeta se quedará sin oxígeno; perderá su habilidad de mantenerse sujeta y se liberará. Las condiciones de alta carga provocarán también la separación. El efluente recolectado debe ser clarificado en un tanque de sedimentación para eliminar cualquier biomasa que se haya desprendido del filtro.

4.2.3. Sistemas de biodiscos

Este sistema consiste en una serie de discos circulares de polietileno de alta densidad, que se sumergen en las aguas residuales mediante un giro en la misma. Los discos cilíndricos están conectados a un eje horizontal en tamaños estándares aproximados de 3.5 metros de diámetro y 7.5 metros de longitud. Dichos discos son parcialmente sumergidos en el agua (por lo general un 40%).

En un tanque con agua residual el disco gira lentamente de 1.0 a 1.6 revoluciones por minuto. Como los discos giran fuera de las aguas residuales la aireación se realiza mediante la exposición a la atmosfera. Las aguas residuales fluyen hacia abajo a través del disco, y se produce el desprendimiento.

Durante el proceso se forma gradualmente una masa microbiana que comienzan a depositarse en la superficie de los discos.

Su diseño generalmente consiste en un número de unidades instaladas en serie. El número de etapas depende de los objetivos del tratamiento que van de cuatro etapas para la eliminación de la DBO y seis o más para la nitrificación.



Figura 19. Planta de tratamiento de aguas residuales de Teuchitlán, Jalisco (Fuente: Operación y Mantenimiento de Aguas residuales. CEA Jalisco).

4.2.4. Sistema biológico de membranas

Este sistema se lleva a cabo con la combinación de un proceso de lodos activos y de separación de membranas, mediante la introducción de un módulo de membranas en lugar del tanque de sedimentación en el sistema de lodos activados.

La ventaja que presenta este proceso frente al de lodos convencional son:

- La eliminación del sedimentador secundario reduciendo el espacio requerido para las instalaciones
- Eliminación de los problemas derivados de la sedimentación de lodos
- Efluentes de mayor calidad comparables a los obtenidos en algunos procesos de tratamiento terciario
- Manejo de fluidos con elevadas concentraciones de sólidos

Existen seis tipos de configuraciones principales en los procesos de membrana, existiendo diferencias prácticas con beneficios y limitaciones distintas. La elección de cada configuración depende del tipo de efluentes que deben tratarse teniendo en cuenta parámetros como, viscosidad, temperatura, oxígeno disuelto, tendencia a formar espumas, características de los flóculos, la hidrofobicidad y la carga superficial. Los tipos de membrana más usados son las de fibra hueca y placa plana.

Adicionalmente el uso de aire en este sistema es necesario no solamente para aprovechamiento de las bacterias en su labor biodegradativa, sino también, por las ventajas que se obtienen en la limpieza de la superficie de la membrana y por el impedimento del crecimiento microbiano sobre la superficie de la membrana.

Su funcionamiento se basa en que el agua es filtrada pasando a través de las paredes de una membrana, debido a una pequeña depresión producida por una bomba centrífuga. El agua filtrada es extraída del sistema mientras el fango y los compuestos de tamaño mayor al poro de la membrana quedan retenidos. El ciclo se alterna con un retrolavado, en el que se invierte el sentido del flujo para forzar el paso de agua filtrada, desde el interior al exterior de la membrana para limpiarla.

4.2.5. Biomedia

Es un proceso biológico de lodos activados donde al reactor se le agrega un medio plástico que ayuda a incrementar la capacidad del tratamiento, reduciendo el tamaño y el volumen. Esta medida mejora el proceso de lodos activados proporcionando una mayor concentración de biomasa en el tanque de aireación y así ofrecer la posibilidad de reducir los requisitos de tamaño. Con esta tecnología es posible manejar condiciones de gastos muy elevados sin ningún tipo de problema de obstrucción y con espacios de instalaciones relativamente pequeños.

4.2.6. Sistema de lagunas de estabilización

Están constituidas por ensambles artificiales, abiertos a la acción del sol y del aire, dispuestos en el terreno natural, y delimitados por bordos compactados de material, producto de la excavación. Para el control de estos procesos biológicos es aún más importante la temperatura del ambiente y el tiempo de retención.

De acuerdo a su clasificación y contenido de oxígeno las lagunas se clasifican como:

1. Anaerobias
2. Facultativas
3. Aerobias

Anaerobias

Las lagunas anaerobias son las más pequeñas dentro del sistema de tratamiento de aguas residuales. Este tipo de lagunas por lo general reciben aguas con altas cargas orgánicas que producen condiciones anaerobias (oxígeno disuelto ausente) en todo el volumen de la laguna que es su principal característica manteniendo microorganismos anaerobios.

Este sistema trabaja de manera óptima en los climas calientes, tropicales y subtropicales, dado que la intensidad del brillo solar y la temperatura ambiente, son factores clave para la eficiencia en los procesos de degradación.

Facultativas

Las lagunas facultativas son diseñadas para la remoción de la demanda bioquímica de oxígeno con base en una carga orgánica superficial que permite el desarrollo de una

población de alga activa. De este modo, las algas producen el oxígeno requerido por las bacterias para remover la DBO soluble.

Las lagunas pueden tornarse rojas o rosadas cuando existen bacterias fotosintéticas purpuras oxidantes del sulfuro, en su composición. De esta manera el cambio de coloración en las aguas es un buen indicador cualitativo del funcionamiento del proceso de degradación.

Aerobias

Son grandes depósitos de poca profundidad donde los microorganismos se encuentran en suspensión y prevalecen condiciones aerobias. El oxígeno es suministrado en forma natural por la aeración de la superficie artificial a través de aireadores mecánicos y por la fotosíntesis de las algas. La población biológica comprende bacterias y algas.

Las algas constituyen la mejor fuente de oxígeno, para mantener las condiciones aerobias. El oxígeno liberado por las algas es utilizado por las bacterias en la degradación de la materia orgánica. El dióxido de carbono y los nutrientes liberados por las bacterias es a su vez, utilizado por las algas para la fotosíntesis. Esta relación simbiótica constituye el componente, fundamental del proceso.

4.2.7. Clarificador secundario

En esta unidad se lleva a cabo el proceso de sedimentación de los sólidos en suspensión provenientes del reactor biológico. Pueden ser de forma circular o rectangular, y contar con un sistema de mamparas para la separación de natas y espumas.

El objetivo del clarificador secundario es depurar el lodo, por ejemplo, en el tratamiento de lodos activos y separarlo del agua residual.

Los clarificadores tienen varios mecanismos para eliminar los sólidos. Los clarificadores circulares y cuadrados tienen colectores de remoción hidráulica o rotatorios, y los rectangulares utilizan colectores de cadena o de puente móvil.

Existen diversos enfoques en el diseño de las instalaciones de clarificación secundaria. El método utilizado más comúnmente es la base de diseño de acuerdo a la carga hidráulica superficial, carga de sólidos en el agua y profundidad del sedimentador.

4.3. Tratamiento terciario

El tratamiento terciario es el procedimiento más completo para tratar el contenido de contaminantes aun presentes después de los procesos anteriormente tratados en las aguas residuales; sin embargo, a la actualidad no es ampliamente utilizado por ser muy costoso. Este tratamiento consiste en un proceso físico-químico que utiliza la precipitación, la filtración y/o la cloración para reducir drásticamente los niveles de nutrientes inorgánicos, como fosfatos, nitratos, metales pesados y sales del efluente final.

Un tratamiento de estas características proporciona una etapa final para aumentar la calidad del agua al estándar requerido, marcando como parámetro a seguir el nivel de calidad del agua requerido ya sea para su reutilización o desecho a un cuerpo receptor (mar, río, lago, campo, etc.). Más de un proceso terciario del tratamiento puede ser utilizado en una planta de tratamiento ya que existen posibilidades de combinación de los procesos.

Una mejor posibilidad en estos procesos consiste en agregar uno o más estanques en serie a una planta de tratamiento convencional. El agregar estos estanques de depuración, es una forma de mejorar una planta establecida, de esta manera inclusive se puede llegar a emplear estas aguas para riego de cultivos, en zonas verdes de ciudades entre otras actividades.

El tratamiento avanzado o terciario es de gran interés por la necesidad de una fuente adicional de agua y por el impacto ecológico que están teniendo las aguas industriales entre ellas las asociadas a las actividades petroleras.

Algunos de los tratamientos utilizados con éxito en la actualidad o que tienen un gran potencial en esta área por su eficiencia en el mejoramiento de la calidad de las aguas se presentan a continuación.

4.3.1. Filtración

En el tratamiento de agua, el sistema fundamental para remover partículas que no fue posible remover en procesos anteriores, es la filtración. Los procesos de filtración más comunes emplean un medio granular de ciertas dimensiones y profundidad. Este proceso consiste en la eliminación de sólidos suspendidos por medio del paso del agua

contaminada a través de filtros de diferentes diámetros, reteniéndose los sólidos de diámetro menor al tamaño de la porosidad del material utilizado.

La filtración se emplea cuando la cantidad de materia que debe retenerse es grande y la dimensión de las partículas contenidas en el agua es relativamente pequeña.

Los principales tipos de filtración son:

1. Filtración lenta por arena
2. Filtración rápida por arena
3. Filtración a presión
4. Filtración utilizando diatomeas

En general, el tipo de filtro que se debe emplear para el tratamiento de agua depende de las etapas primarias de remoción que fueron utilizadas.

Los materiales de relleno de los filtros más empleados son arenas, antracita y tierra de diatomeas.

Filtración por arenas

La filtración con arenas es de los métodos más probados en la industria, se utiliza con frecuencia en las plantas de tratamiento de agua para separar sólidos suspendidos en el flujo que pueden representar una parte importante de la DBO de los efluentes de las plantas de tratamiento.

Consiste en una capa múltiple de arena, con variedad en tamaño y gravedad específica. Estos filtros pueden ser manejados manualmente o de forma automática haciendo circular agua lentamente a través de este.

El filtro de arena actúa de tres formas distintas:

1. Filtración, para separar las partículas de agua que hay que tratar.
2. Floculación, mediante la cual los contaminantes se adhieren a la superficie de la arena y aumentan así su tamaño.
3. Asimilación, mediante microorganismos que se alimentan de los contaminantes del agua.

Filtración por grava

El filtro de grava es ampliamente usado para remover sólidos suspendidos y retiene las partículas suspendidas en el agua. En este tipo de filtros, el agua fluye a través del lecho de grava.

Las propiedades del medio, causan que el agua tome caminos erráticos y largos trayectos, lo cual incrementa la probabilidad de que el sólido tenga contacto con otras partículas suspendidas, y con el medio formado en la superficie del gránulo de grava o arena, siendo de esta manera retenido entre el material filtrante. Para una filtración o separación de sólidos más eficiente, también es conveniente darle un tratamiento previo al agua a tratar, agregándole sustancias químicas que causen la coagulación y floculación de las partículas, ya que es más probable que el coágulo o flóculo sea retenido en el lecho del filtro que una sola partícula en estado coloidal.

Filtración por antracita

Básicamente es carbón activado triturado y tamizado en gránulos. Es un buen complemento para los filtros de medios múltiples, en compañía de arena.

Los materiales de filtros de antracita se seleccionan específicamente de minas profundas que tienen el porcentaje más alto de carbono. La antracita se caracteriza por producir mejoras confiables en la extracción de turbidez, principalmente a su mayor capacidad de retener sólidos.

Filtración por gravedad

Cuando se usan filtros por gravedad se deben de someter a un proceso de pretratamiento que incluye una floculación. Estos filtros por gravedad también pueden ser utilizados para la reducción de hierro y magnesio, seguido de los tratamientos de aireación u oxidación química y/o clarificadores.

Los filtros son realizados de manera cilíndrica o rectangulares. Las válvulas de control y los medios de filtrado, generalmente son automáticos y se instalan por el fabricante en el de operación del equipo.

Filtración a presión

Los sistemas de filtrado a presión son diseñados para llevar a cabo operaciones de filtrado en recipientes cerrados, debido a que estos filtros de presión tienen una alta tasa de filtración y la habilidad de operar bajo una mayor pérdida de carga comparado con los filtros de gravedad convencionales.

En los filtros de presión el agua tratada es distribuida sobre el área de filtración utilizando un sistema de distribución del flujo de agua bien diseñado. El agua es filtrada a través de las diferentes capas de la cama del filtro. El lecho filtrante remueve mecánicamente la suciedad, sólidos en suspensión, sedimentos, algas bacterias, gusanos microscópicos, asbestos, color olor, precipitados de hierro y magnesio y otras impurezas.

La cama del filtro está diseñada para capturar y retener, los sólidos en suspensión y las impurezas, en toda la profundidad de la cama, incrementando así a capacidad de retención de sólidos.

Filtros de disco

Los filtros de disco (también conocidos como microtamiz), son un sistema de filtración superficial que utiliza paneles filtrantes plegados con una configuración única, donde la filtración se realiza desde adentro hacia afuera, proporcionando un máximo rendimiento en la filtración y un fácil rechazo de la materia inorgánica.

El flujo pasa a través de los paneles filtrantes permitiendo la captura eficiente de los sólidos suspendidos y favorece el rendimiento del sistema de retrolavado. La filtración de adentro hacia afuera combinado con la dinámica del tambor centra, hace que, además de su simplicidad, se elimina la necesidad de disponer de una unidad adicional para manejar los materiales flotantes y sedimentables. El filtro de discos aísla los contaminantes de forma efectiva permitiendo su fácil y rápida separación.

Normalmente estas unidades de filtración utilizan discos rotativos contruidos por paneles que incorporan una tela o malla como medio filtrante. La diferencia entre usar estos materiales se encuentra en que la tela es un medio filtrante muy variable debido a que su material son fibras textiles haciendo imposible la clasificación de su capacidad de filtración, a diferencia con la malla que tiene un paso constante por su diseño preciso, haciendo que los resultados sean predecibles.

4.3.2. Adsorción en carbono activo

El proceso de adsorción consiste, en términos generales, en la captación de sustancias solubles presentes en la interfase de una solución. Esta interfase puede hallarse entre un líquido y un gas, un sólido o entre dos líquidos diferentes, concentrando un soluto en la superficie de un sólido.

En este proceso el sólido puede ser el llamado carbono activado el cual se denomina adsorbente y el soluto a adsorber se denomina adsorbato.

El tratamiento agua con carbono activado se le considera un proceso de refinación del agua. El carbón se emplea para eliminar la materia orgánica disuelta, olores y sabores que producen los contaminantes. Asimismo, es posible eliminar parte de la materia particulada también presente, dependiendo de la forma en que entran en contacto el carbón y el agua.

Los carbonos activos se preparan a partir de materias primas carbonosas tales como madera, lignito, carbón y cascaras de nuez mediante procesos térmicos que implican la deshidratación y carbonización, seguido de la aplicación de vapor caliente.

Los tipos de carbón empleados son:

- Carbón activado granular: diámetro superior a los 0.1 milímetros
- Carbón activado en polvo

La ventaja de utilizar carbono activo como adsorbente se encuentra en la posibilidad de reactivación (hasta 30 veces o más) sin pérdida apreciable de adsorción. Usualmente esta reactivación se lleva a cabo calentando el carbón ya utilizado hasta 930° centígrados aproximadamente. Los contaminantes adsorbidos se queman y el carbón activado se restaura hasta su capacidad inicial de adsorción; sin embargo, es necesario agregar carbón nuevo para compensar las pérdidas en este proceso, que van del 5 al 10%.

Tratamiento con carbono activado granular

Se suele emplear una columna como medio de contacto del agua residual con el activado granular. El carbón está soportado por medio de un sistema de drenaje situado en la parte inferior del tanque.

Normalmente es necesario disponer de un sistema para el lavado a contracorriente y para la limpieza de la superficie, con el objetivo de limitar las pérdidas de carga producidas por la retención de la materia particulada en el interior de la columna de carbón.

Tratamiento con carbono activado en polvo

Este sistema consiste en añadir carbón activado en polvo. Se puede añadir al afluente de procesos de tratamiento biológicos o directamente en las unidades de tratamiento.

Una vez transcurrido el tiempo de contacto deseado, se deja que el carbón se sedimente en el fondo del tanque para posteriormente extraer del mismo el agua tratada. Puesto que el carbón es muy fino, para facilitar la eliminación de las partículas de carbón, puede ser necesario emplear un coagulante o llevar a cabo un proceso de filtración en un filtro rápido de arena.

4.3.3. Coagulación- Floculación

El objetivo del proceso de coagulación, es la transformación de las partículas pequeñas que se encuentran suspendidas en el agua, que tienen un tiempo de sedimentación demasiado bajo o nulo, a un aglomerado de mayor tamaño, el cual puede ser removido con mayor facilidad en un sedimentador. Este proceso desestabiliza las partículas suspendidas, de modo que se reduzcan las fuerzas de separación entre ellas.

La floculación tiene relación con los fenómenos de transporte dentro del líquido, para que las partículas hagan contacto. Esto implica la formación de puentes químicos entre partículas, de modo que se forme una malla de coágulos y así se formen partículas suficientemente grandes para sedimentarse.

El termino coágulo se refiere a las reacciones que suceden al agregar un reactivo químico (agente coagulante) en el agua, originando productos insolubles.

La coagulación y floculación, en resumen, son dos procesos dentro de la etapa de clarificación del agua. Ambos procesos se pueden definir como una etapa en la cual las partículas se aglutinan en pequeñas masas tales que su peso específico supere a la del agua y puedan precipitarse.

4.3.4. Intercambio iónico

El intercambio iónico comprende, el intercambio entre los iones presentes en la disolución (contaminantes) y los iones de sólido agregados. Las operaciones de intercambio iónico son básicamente reacciones químicas de sustitución, entre el electrolito en solución y un electrolito insoluble, con el cual se pone en contacto la solución y mediante fuerzas electrostáticas se intercambian iones.

Este proceso es muy importante en el tratamiento de aguas residuales ya que la desmineralización completa puede alcanzarse mediante intercambio iónico, es posible utilizar un proceso de corriente partida, en donde parte del agua desmineralizada se combina con el agua que ha sido desviada del tratamiento para producir un efluente con una calidad específica, por ejemplo una determinada dureza deseada.

El agente encargado para llevar esta reacción a cabo son las llamadas resinas de intercambio iónico, que son polímeros insolubles a los que se le añaden grupos básicos

mediante reacciones químicas. Estos grupos son capaces de intercambio. Las partículas de resina tienen generalmente diámetros de 5 milímetros y se emplean directamente en el agua.

Existen dos tipos de resinas para el intercambio:

1. Catiónicas: Intercambia iones positivos (cationes); estructura con grupos funcionales ácidos
2. Aniónicas: Intercambia iones negativos (aniones); estructura con grupos funcionales básicos

El número total de grupos funcionales, peso o volumen de resina, determina la capacidad de cambio; tipo de grupo funcional determina la selectividad y posición del equilibrio de intercambio.

Las resinas de intercambio catiónico separan los cationes de una solución, intercambiándolos por iones de sodio o por iones de hidrogeno.

Los iones Cobre, Zinc, Níquel, Calcio y Magnesio quedan retenidos sobre la resina y produce una disminución en la dureza del agua. Este afluyente ablandado contiene principalmente sales de sodio o acido, dependiendo el tipo de intercambio realizado.

En cambio, las resinas intercambiadoras aniónicas separan aniones de una solución. De esta forma aniones como sulfatos y cromatos se eliminan de la solución.

4.3.5. Microfiltración, Ultrafiltración y Nanofiltración

La presencia de parásitos y niveles más elevados de solidos disueltos ha iniciado un nuevo campo de aplicación para las membranas en el sector del agua residual. La ineficiencia de las plantas de filtración convencionales para filtrar y desinfectar estos agentes patógenos del agua, ha obligado a la industria a buscar nuevas tecnologías.

Las membranas son barreras absolutas para aquellos paracitos cuyo tamaño excede el tamaño del poro de la membrana, Las membranas de microfilmación garantizan la remoción de parásitos, así como la turbiedad mediante la microfiltración y el tratamiento de agua salobre o con color, mediante nanofiltración.

El principio de estos tratamientos en la separación física, realizando la separación de partículas basado en el tamaño de los poros y su distribución.

El tamaño del poro de la membrana determina hasta qué punto se desea eliminar los sólidos disueltos.

Tabla 9. Tamaño de poro en membranas de filtración (Fuente: Tratamiento de aguas residuales, R. S. Ramalho).

Tratamiento	Tamaño de poro en micras [μm]
Microfiltración	0.075-3
Ultrafiltración	0.01
Nanofiltración	0.001-0.005

Las membranas están hechas de materiales como cerámica, polímeros y materiales sintetizados. Mientras que las cerámicas y los metales se usan generalmente en aplicaciones industriales, las membranas poliméricas se están convirtiendo en una herramienta común para el tratamiento de agua potable.

Las membranas trabajan aplicando presión, para conducir al agua limpia a través de la misma, dejando detrás el concentrado que contienen las partículas y sólidos separados.

El proceso, básicamente consiste en impulsar el agua residual a presión mediante bombas eléctricas para que pase por los poros de la membrana.

Las ventajas relacionadas con el uso de membranas en el tratamiento de aguas residuales son:

- Menor requerimiento de energía
- Efecto barrera para microorganismos
- Menor cantidad de cloro requerido para la etapa de desinfección
- Poco requerimiento de productos químicos
- Menor espacio requerido para instalaciones
- Buena calidad del producto final
- Mantenimiento mínimo del sistema

4.3.6. Ósmosis inversa

En el caso de la ósmosis, el solvente pasa espontáneamente de una solución menos concentrada a otra más concentrada, por una membrana semipermeable (permeable al solvente, pero impermeable al soluto).

El solvente pasará en el sentido deseado hasta alcanzar el equilibrio. Al momento de agregar presión a la solución más concentrada, el flujo de solvente se detendrá cuando la presión aplicada sea igual a la presión osmótica aparente entre ambas soluciones.

La presión osmótica aparente es una medida de la diferencia de energía potencial entre ambas soluciones, cuando el soluto ya no presenta movimiento, llegando al equilibrio.

Si se aplica una presión mayor a la solución más concentrada en equilibrio, el solvente comenzará a fluir en el sentido inverso, llegando así al fenómeno de la ósmosis inversa. El flujo de solvente es una función de la presión aplicada, de la presión osmótica y del área de la membrana presurizada.

En los tratamientos de aguas residuales mediante ósmosis inversa, el proceso se lleva a cabo mediante un sistema de configuración tubular (figura 5). El agua residual fluye bajo presión elevada (superior a la presión osmótica) por un tubo interior formado por material semipermeable. El agua purificada se separa en el tubo exterior, que se encuentra a presión atmosférica.

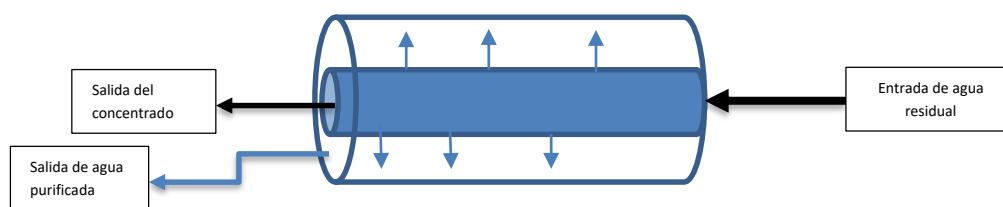


Figura 20. Diagrama de un sistema tubular para tratamiento de ósmosis inversa (Fuente: Tratamiento de aguas residuales, R. S. Ramalho).

Las primeras aplicaciones de la ósmosis inversa se hicieron en la desalación de agua del agua de mar; sin embargo, se ha comenzado a emplear en la separación de contaminantes de las aguas residuales.

Contaminantes como compuestos nitrogenados y fosforo, cromatos y algunos compuestos orgánicos, son separados con este proceso eficientemente. Por lo tanto, el tratamiento de agua residual puede ser complementado con este proceso, si la economía del proyecto lo permite.

Dentro de las principales ventajas de este proceso se encuentran:

- Permite remover la mayoría de los sólidos disueltos (orgánicos e inorgánicos) disueltos en el agua (hasta el 99%).

- Remueve los materiales suspendidos y los microorganismos.
- Solo requiere de una etapa para purificar el agua.
- Funcionamiento simple y no requiere de mucho mantenimiento.
- Poco espacio requerido de las instalaciones.

4.3.7. Electrodiálisis

La electrodiálisis se desarrolló para la desalación del agua de mar. Es un método de eliminación para contaminantes inorgánicos de las aguas residuales y puede definirse como una tecnología de membrana que permite bajo la influencia de un campo eléctrico continuo, extraer sustancias ionizadas disueltas en una solución acuosa, a través de una membrana de intercambio iónico. Es por ello una posible etapa final en el proceso de tratamientos de aguas.

Este sistema consta de un conjunto de membranas de intercambio catiónico (permeable solo a cationes) y de intercambio aniónico (permeable solo aniones) espaciadas alternadamente entre dos electrodos de tal forma que dan lugar a dos compartimientos.

El cátodo y el ánodo se colocan en los dos extremos de las celdas, como se muestra en la Figura 21, de tal forma que la membrana más próxima al cátodo sea permeable a los cationes y la más próxima al ánodo sea permeable a los aniones.

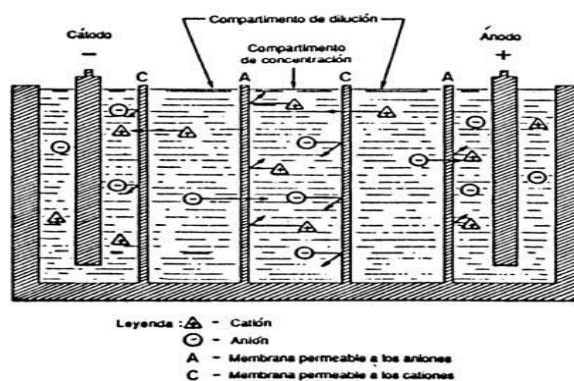


Figura 21. Celda electrolítica (Fuente: Tratamiento de aguas residuales, R. S. Ramalho).

El agua residual cruda se alimenta continuamente en los compartimientos de concentración y el agua residual tratada se extrae continuamente de los compartimientos de dilución.

Al conjunto de celdas se le denomina módulo de electrodiálisis, en la cual puede haber hasta 500 celdas.

Para un funcionamiento adecuado de la celda, la materia en suspensión debe separarse antes del proceso. Si esto no se hace, estos materiales pueden provocar el ensuciamiento de las membranas, lo que provoca un aumento en la resistencia eléctrica. Por lo tanto, la capacidad desmineralizadora del equipo disminuye.

Para disminuir este problema es conveniente separar, antes de iniciar el proceso de electrodiálisis, la materia en suspensión coloidal y los iones orgánicos. Esto dependerá de la economía del proyecto ya que se realiza mediante la adición de coagulantes, filtración y/o adsorción en columnas de carbón activado.

4.3.8. Desinfección

El impacto de las aguas residuales no tratadas en las fuentes de agua para uso como recurso humano, desde consumo como agua potable hasta fuente de riego, han significado grandes problemáticas de salud y seguridad ambiental ya que en ella se encuentran organismos que afectan negativamente a los seres vivos. En respuesta a esto, la desinfección se ha convertido en uno de los principales mecanismos para la destrucción de los organismos patógenos. Para que la desinfección sea efectiva, el agua residual debe ser tratada adecuadamente.

Entre los principales tratamientos disponibles se encuentran:

- Cloración
- Rayos ultravioletas
- Ozono
- Dióxido de cloro

Aplicar uno u otro dependerá de los niveles requeridos y destino final del agua. En la Tabla 10 se encuentran las ventajas y desventajas que estos sistemas tienen:

Tabla 10. Ventajas y desventajas de los tratamientos para la desinfección Fuente: Operación y Mantenimiento de Aguas residuales. CEA Jalisco).

Tratamiento	Ventajas	Desventajas
Cloración	<ul style="list-style-type: none"> • Tecnología comprobada. • Prolongado efecto de desinfección. • Efectividad muy alta. • Oxidación de compuestos orgánicos e inorgánicos. • Eliminación de olores. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tóxico para organismos acuáticos. • Requiere descoloración. • Corrosivo y tóxico. • Riesgos de manejo. • Oxida ciertos materiales orgánicos generando compuestos más peligrosos. • Aumenta nivel de SDT. • Requiere altos volúmenes para desinfección. • Algunos organismos son resistentes al cloro
Rayos ultravioletas	<ul style="list-style-type: none"> • Eliminación de la mayoría de organismos • Proceso físico, elimina la necesidad de operar productos químicos peligrosos. • No tiene efecto residual una vez finalizado el proceso. • Fácil operación del sistema. • Tiempo de desinfección más corto. • Poco espacio requerido. 	<ul style="list-style-type: none"> • Algunos organismos pueden invertir los efectos destructivos de la radiación. • Mantenimiento constante del equipo. • Baja eficiencia en condiciones de turbidez o altos nivel de SDT. • Costos relativamente altos
Ozono	<ul style="list-style-type: none"> • Eficacia de eliminación más alta que el cloro. • Periodos cortos para la desinfección. • El ozono se descompone rápidamente, no necesita un proceso posterior para ser eliminado. • El ozono es generado dentro de la planta. • Se eleva el oxígeno disuelto en el efluente. 	<ul style="list-style-type: none"> • Reactivo y corrosivo. • Requiere equipos complejos y resistentes. • Al ser irritante y tóxico representa peligros a los operarios. • Alta demanda de energía. • Costos de equipos elevados. • Costos de operación elevados.
Dióxido de cloro	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor eficiencia que la del cloro • Neutraliza olores, sabores y colores. • Tiene eficiencia en un rango más amplio de pH. • Oxida sustancias orgánicas e iones metálicos • Requiere poco tiempo de contacto. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tóxico • Requiere de instalaciones en la planta para producirlo por su complejidad para transportarlo, • Requiere un proceso de eliminación residual. • Menor eficiencia que el tratamiento con ozono • Altos costos de instalaciones

Capítulo 5. Análisis composicional del agua de producción de un campo petrolero en México y problemática para la utilización

Una correcta caracterización del agua asociada a la producción de hidrocarburos es fundamental para poder implementar un tratamiento, con el cual se logre una purificación tal, que pueda utilizarse esta agua residual como fuente de agua de riego.

Recientemente, se han aprobado leyes en varios estados de los Estados Unidos de Norteamérica, que requieren el uso de fuentes de agua salina o tratada para riego de césped (*California State Water Resources Control Board, 1993*). Las fuentes salinas requeridas para su uso en el césped pueden incluir agua regenerada (aguas residuales), agua salobre salada o por intrusión de agua de mar, y otras fuentes. Esta medida se toma ya que la escases de agua dulce comienza a ser un gran problema a nivel mundial principalmente en zonas áridas, donde la urbanización demanda gran cantidad de recursos principalmente agua. Por ello, es necesario tener alternativas de suministro de agua para cuidar este vital recurso y usarla únicamente en actividades donde su uso es primordial.

Dentro de la industria petrolera se tiene un gran potencial de disponibilidad en grandes volúmenes de aguas residuales; sin embargo, la gran problemática se encuentra en los altos niveles de salinidad, contenido de materia orgánica, metales pesados, entre otros componentes asociados haciendo que su tratamiento tenga costos muy elevados, no siendo rentable dentro de los proyectos de las empresas que se enfrentan a este posible recurso. Encontrar una alternativa viable para el tratamiento daría como resultado beneficios económicos y ambientales para la sociedad.

Hay que tener en cuenta que es peligroso utilizar esta agua sin ningún tratamiento previo, es por eso que la gran mayoría opta por el desecho de este fluido de las instalaciones petroleras ya que además de presentar problemas para los equipos, tienden a deteriorar las instalaciones, haciendo que los proyectos petroleros ya sean rentables.

5.1. Descripción de la muestra

Se obtuvo una muestra de agua congénita a condiciones de batería de separación de un campo en México y se le realizó el análisis composicional detallado (balance iónico y orgánico), contaminantes básicos y metales pesados.

La NOM-001-SEMARNAT-1996 describe a continuación los contaminantes básicos y metales pesados:

- Contaminantes básicos: Son aquellos compuestos y parámetros que se presentan en las descargas de aguas residuales y que pueden ser removidos o estabilizados mediante tratamientos convencionales. En lo que corresponde a esta Norma Oficial Mexicana solo se consideran los siguientes: grasas y aceites, materia flotante, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales, demanda bioquímica de oxígeno, nitrógeno total (suma de las concentraciones de nitrógeno Kjeldahl de nitritos y de nitratos expresadas como $[mg/l]$ de nitrógeno), fósforo total, temperatura y pH.
- Metales pesados: Son aquellos que, en concentraciones por encima de determinados límites, pueden producir efectos negativos en la salud humana, flora o fauna. En lo que corresponde a esta Norma Oficial Mexicana solo se consideran los siguientes: arsénico, cadmio, cromo, mercurio, níquel, plomo zinc y cianuros.

El análisis composicional del agua de producción se obtuvo aprovechando un estudio realizado en campo mediante el método de Stiff y Davis, el cual se utiliza para conocer el índice de saturación (SI), que sirve como indicador de la tendencia del agua para disolver o precipitar el carbonato de calcio y así saber si el agua producida formará incrustación de $CaCO_3$ o si será corrosiva en la tubería y equipos. Si este índice es negativo, el agua está bajo saturada con $CaCO_3$ y la formación de incrustación es improbable (el agua es corrosiva). Si el índice es positivo, el agua está supersaturada con $CaCO_3$ y la formación de incrustación es probable, si el índice es cero, el agua está en el punto de saturación.

En la Tabla 11 se muestran los resultados obtenidos de este análisis:

Tabla 11. Análisis físico-químico de la muestra (Fuente: Laboratorio de producción de hidrocarburos y control de la corrosión, IMP).

Parámetro	Concentración
Temperatura (°C)	20
pH	7
Sólidos disueltos totales (mg/l)	48,126.12
Conductividad (mS/cm)	69
Dureza Total (mg/l)	5330
Acidez (mg/l)	0
Salinidad (mg/l)	47,474.36
Sodio (mg/l)	16,279.55
Calcio (mg/l)	1,560
Magnesio (mg/l)	534.82
Hierro (mg/l)	0.35
Manganeso (mg/l)	0
Potasio (mg/l)	371.4
Azufre (mg/l)	83.7
Níquel (mg/l)	0.01
Estroncio (mg/l)	67.7
Sílice (mg/l)	20.27
Bario (mg/l)	30
Cloruros (mg/l)	28,800
Bicarbonatos	48.8
Sulfatos (mg/l)	775

Es evidente que no es posible tener un uso de esta agua sin un tratamiento previo y mucho menos para ser utilizada para irrigación ya que puede provocar diversos problemas en el crecimiento de la planta o directamente al ecosistema, expuestos a lo largo de este capítulo, además de los mencionados en el Capítulo 2.

5.2. Problemas presentes en la planta provocados por altos niveles de salinidad

Los efectos perjudiciales de la salinidad en el crecimiento de las plantas incluyen el estrés osmótico, la toxicidad iónica y los trastornos nutricionales (*Greenway y Munns, 1980; Lauchli, 1986; Cheeseman, 1988*). Las plantas tolerantes a la sal tienen la capacidad de minimizar estos efectos perjudiciales produciendo una serie de adaptaciones anatómicas, morfológicas y fisiológicas (*Poljakoff-Mayber, 1975, 1988*).

Los problemas de salinidad en las plantas suelen ser difíciles de diagnosticar y generalmente costosos. Los principales factores que se miden para conocer calidad del agua y suelo relacionados a la salinidad son:

- salinidad total
- sodio
- bicarbonatos

5.2.1. Salinidad total

El agua salina y el suelo se componen de varios tipos de sales; los más comunes son sodio, potasio, calcio y magnesio asociados con aniones cloruro, sulfato, carbonato y bicarbonato (*Rhoades, 1972*). La salinidad total se expresa como conductividad eléctrica (*EC*) o como sales totales disueltas (TDS) en partes por millón (*ppm*).

En la Tabla 12 se muestra la clasificación del agua de riego en función de la salinidad:

Tabla 12. Clasificación del agua de riego en función de la salinidad (Fuente: U.S. Salinity Laboratory, 1969).

Nivel	Medida [<i>dS/m</i>]
Bajo	0.25
Medio	0.25-0.75
Alto	0.75-2.75
Muy alto	>2.25

Mientras que el suelo se clasifica como solución salina cuando EC_e (conductividad eléctrica de la muestra saturada) es mayor a 4 [dS/m] (*US Salinity Laboratory, 1969*). La mejor manera de monitorear la salinidad es midiendo la EC_e del suelo y la tolerancia a la salinidad de la planta, se expresan generalmente sobre la base de EC_e (*Marcum, 1999*).

Las sales pueden acumularse rápidamente en el suelo con el uso de agua salada, particularmente cuando la evaporación de la zona es alta. Para evitar efectos negativos por la sal, la salinidad del suelo debe mantenerse por debajo del nivel de tolerancia a la salinidad la planta. Uno de los factores que nos ayuda a esto es la lixiviación, que es el fenómeno mediante el cual las aguas de lluvia o de riego arrastran los nutrientes minerales de las plantas o los alejan fuera del alcance del sistema radicular (raíces de la planta) de éstos. De ello, resulta el deterioro progresivo de la fertilidad del suelo, un aumento de la acidez de los suelos y en ocasiones efectos tóxicos debidos a la alteración o desequilibrio de los componentes químicos del suelo.

La lixiviación es importante donde se producen precipitaciones fuertes o donde el riesgo es excesivo y suelos con textura muy arenosa. La fertilidad del suelo disminuye muy rápidamente cuando se elimina la cobertura orgánica.

5.2.2. Problemas de sodio

Los problemas de salinidad de las plantas se combinan a menudo con los efectos del sodio (Na) en la dispersión de los coloides del suelo, lo que resulta en una pérdida de estructura del suelo. La pérdida de estructura da lugar a suelos propensos a la compactación, con anaerobiosis resultante y pérdida de enraizamiento. La anaerobiosis también tiene el efecto de aumentar el transporte de sal a los brotes, disminuyendo el crecimiento y la supervivencia de las plantas (*Barrett-Lennard, 2003*). Además, el potencial de lixiviación se pierde, acelerando la acumulación de sales dentro de la zona de raíz. La dispersión del coloide del suelo se ve afectada por la relación de Na a los cationes divalentes de calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}) en el agua de riego, relación conocida como adsorción de sodio (SAR).

Según la (*US Salinity Laboratory, 1969*), las aguas de riego se clasifican en cuanto a su riesgo de sodio mostrado en la Tabla 13:

Tabla 13. Clasificación del agua de riego en función del SAR (Fuente: U.S. Salinity Laboratory, 1969)

Nivel	Medida [SAR]
Bajo	0-10
Medio	10-18
Alto	18-24
Muy alto	>24

Las arcillas son más susceptibles a la desfloculación que el limo, por lo tanto, la adsorción de sodio (SAR) medios pueden ser un problema sólo en suelos de textura fina, y particularmente en suelos ricos en illita o montmorillonita. Los SAR altos serán un problema en todos los suelos excepto las arenas, y SARs muy altos no se deben usar sin yeso o enmiendas similares.

5.2.3. Problemas de bicarbonatos

El problema con el bicarbonato (HCO_3) y el carbonato (CO_3) (concentración de bicarbonato en el agua de riego) generalmente se clasifica de acuerdo a su concentración ilustrado en la tabla 14:

Tabla 14. Clasificación del agua de riego en función del bicarbonato (Fuente: U.S. Salinity Laboratory, 1969)

Nivel	Concentración en [ppm]
Baja	0-120
Moderada	120-180
Severa	180-600
Muy severa	>600

Cuando los bicarbonatos son un problema, se utilizan típicamente enmiendas acidificantes, tales como azufre o ácido sulfúrico. El ácido reacciona directamente con el bicarbonato para formar dióxido de carbono. Además, el ácido sulfúrico reaccionará con el carbonato cálcico del suelo para formar yeso, reduciendo así la problemática del sodio. Por lo tanto, los productos de azufre sólo deben aplicarse en situaciones en las que abunda carbonato de calcio, lo cual es típico en muchos suelos áridos. El azufre en polvo puede ser agregado al suelo, o al agua, las tasas de aplicación deben ser mínimas para evitar quemaduras de la planta [$<2,2 \text{ kg por } 93 \text{ m}^2$ (1000 pies^2)] y cuando las temperaturas son superiores a $21 \text{ }^\circ\text{C}$ para permitir la oxidación del azufre por las bacterias del suelo para formar ácido sulfúrico. Alternativamente, el ácido sulfúrico puede inyectarse directamente en el sistema de riego para neutralizar los bicarbonatos. La inyección debe ser a una tasa

baja, suficiente para neutralizar sólo el 70-80% de bicarbonatos, de lo contrario, el pH del agua de riego caerá precipitadamente.

5.3. Caso de estudio

Este trabajo se centra en algunos experimentos realizados por la Universidad de Arizona, Universidad Estatal de Colorado (*NASIM E. PICA, KEN CARLSON, JEFFREY J. STEINER, REAGAN WASKOM, 2017*), la Universidad Ben-Gurión del Néguev de Israel (*D. PASTERNAK, A. NERD, Y. DE MALACH, 1993*) y Universidad Hebrea de Jerusalén (*EFFI TRIPLER, URI SHANI, YECHEZKEL MUALEM, ALON BEN-GAL, 2011*), todos ellos enfocados a la reutilización del agua residual asociada a la producción de hidrocarburos o tratadas como fuente de irrigación de diversas especies de plantas tolerantes a la salinidad y niveles elevados de materia orgánica.

El experimento citado en este trabajo fue realizado por la Universidad de Colorado y el Instituto de Agua de Colorado en los Estados Unidos de Norteamérica (*NASIM E. PICA, KEN CARLSON, JEFFREY J. STEINER, REAGAN WASKOM, 2017*), se utilizó agua residual que es generada como un subproducto de las operaciones de fracturamiento hidráulico y para desarrollos de gas de lutitas o también conocido como gas de esquisto. El objetivo de dicho experimento fue evaluar la respuesta y resistencia de pastizales y la semilla de colza al agua residual como fuente de agua de riego. Este experimento fue realizado en un invernadero a condiciones controladas.

El agua producida utilizada en este estudio se tomó de una planta de procesamiento central comercial que sirve a más de 500 pozos en la Cuenca de Denver-Julesburg. Generalmente, estas muestras de agua tienen altas concentraciones de Carbono Orgánico Total (COT) (concentraciones mayores a 2000 [mg / l]) y Sólidos Disueltos Totales (SDT) en el rango de 20,000-25,000 [mg / l].

Con el fin de estudiar los efectos individuales de estos parámetros en las plantas, se definieron los mejores y peores escenarios que representan SDT-COT alto y SDT-COT bajo, respectivamente. Estas cualidades de agua se consiguieron tratando agua producida a diferentes calidades a través de una secuencia de varios procesos de tratamiento que incluían dilución con aguas superficiales.

Se trabajó con cinco diferentes calidades de agua de riego mostradas todas ellas a distintas concentraciones, con respecto al COT mostradas en la Tabla 15:

Tabla 15. Concentración de COT (Fuente: *Produced water reuse for irrigation of non-foof biofuel crops: effects on switchgrass and repeseed germination, physiology and bomass yield, elsevier, 2017*).

Clasificación	Contenido de COT (mg/l)
Agua de riego A	3.3
Agua de riego B	1.2
Agua de riego C	38.3
Agua de riego D	232.2
Agua de riego E	1352.4

Con respecto a los SDT se midieron los contenidos de los diferentes tipos de sales con respecto a las calidades del agua.

En la Tabla 16 y 17 se muestran las características de cada muestra:

Tabla 16. Contenido de cationes en la mezcla (Fuente: *Produced water reuse for irrigation of non-foof biofuel crops: effects on switchgrass and repeseed germination, physiology and bomass yield, elsevier, 2017*).

Tipo de agua	Sodio (Na) [mg/l]	Potasio (K) [mg/l]	Calcio (Ca) [mg/l]	Magnesio (Mg) [mg/l]	Estroncio (Sr) [mg/l]
Agua de riego A	3.6	0.8	14.4	1.8	<0.1
Agua de riego B	50	5.3	10.5	2.1	ND
Agua de riego C	1275	119	13	13..1	0.3
Agua de riego D	1500	21	61	9.1	ND
Agua de riego E	5175	100	207.5	27.8	37

ND: No disponible

Tabla 17. Contenido de Aniones en la mezcla (Fuente: *Produced water reuse for irrigation of non-foof biofuel crops: effects on switchgrass and repeseed germination, physiology and bomass yield, elsevier, 2017*).

Tipo de agua	TDS [mg/l]	Ec [ds/m]	Boro (B) [mg/l]	Bromo (Br) [mg/l]	Cloro (Cl) [mg/l]	Sulfatos (SO ₄) [mg/l]	Fosfatos (PO ₄) [mg/l]
Agua de riego A	350	0.6	0	<0.1	19.2	<0.5	<0.5
Agua de riego B	400	0.6	0	NP	90.5	ND	0
Agua de riego C	3500	5.5	7.3	17.5	2375	42	0
Agua de riego D	3500	5.5	2.6	NP	2950	ND	0
Agua de riego E	21000	34.4	22	135	10975	94	0

ND: No disponible

Cualidades del Agua

Agua de riego A: esta agua fue utilizada como parámetro del mejor escenario, con las características de agua dulce utilizada para la agricultura, igualmente se usó para el tratamiento de las aguas utilizadas, con niveles de COT y SDT de 3.3 y 310 (mg/l) respectivamente.

Agua de riego B: es la mejor calidad de agua producida, con niveles de COT y SDT de 400 y <5 (mg/l) respectivamente.

Agua de riego C: considerada con salinidad media. Con niveles de SDT de 3500 (mg/l) y con niveles de COT bajos. Para poder evaluar los efectos del contenido orgánico en la planta se varió la concentración de COT en rangos de 65-100 (mg/l).

Agua de riego D: Considerada con salinidad media. Con niveles de SDT de 3500 (mg/l) pero con niveles COT altos. Se varió la concentración de COT en rangos de 215-235 (mg/l).

Agua de riego E: salmuera lavada, considerada el peor escenario, con niveles de SDT en rangos de 15,000-20,000 (mg/l) y COT en concentraciones de 1500 (mg/l).

Material vegetal

Para el experimento se hicieron germinar dos tipos de plantas:

1. Pasto varilla
2. Semilla de colza

Panicum virgatum (Pasto varilla) es una especie nativa de Norte América, se encuentra principalmente en Estados Unidos, Canadá y parte de México. Puede usarse como materia prima para la producción de energía de biomasa, como cobertura del suelo para su conservación y para controlar la erosión, como planta ornamental, para forrajes, pastoreo y como materia prima para plásticos biodegradables.



Figura 22. *Panicum virgatum* (Pasto varilla) (Fuente: www.naturalista.mx)

La colza (*Brassica napus*) es una planta de color amarillo brillante cultivado principalmente por su semilla rica en aceite. La semilla de colza se encuentra en gran parte del mundo por su importancia económica. Según los reportes del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos esta planta es la tercera fuente más grande de aceite vegetal en el mundo. En México se encuentra en gran parte del territorio nacional principalmente en la zona norte y centro del país.

Actualmente, la colza se cultiva para la producción de alimentos para animales, aceites vegetales comestibles y biodiésel.

El aceite de colza se usa como combustible diésel, ya sea como biodiésel, directamente en sistemas de combustible con calefacción o mezclado con destilados de petróleo para alimentar vehículos de motor. El biodiésel se puede utilizar en forma pura en motores más nuevos sin dañar el motor y con frecuencia se combina con diésel de combustible fósil en proporciones que varían de 2 a 20% de biodiésel.



Figura 23. *Brassica napus* (Colza) (Fuente: www.naturalista.mx).

Estas especies pueden tolerar una amplia gama de temperatura, pH del suelo y pueden crecer bajo condiciones de sal, las condiciones marginales del suelo (*Alexopoulou et al, 2008, Lee et al., 2007, Lynd et al., 1991, McLaughlin et al., 2002, McLaughlin y Kszos, 2005, Sanderson et al., 1996*).

Características del suelo utilizado para la plantación

La salinidad del suelo puede causar efectos osmóticos e iónicos específicos (estrés iónico) en las células vegetales que conducen a desequilibrios de nutrientes que afectan importantes procesos fisiológicos y bioquímicos. En última instancia, estos pueden inhibir el crecimiento y desarrollo de las plantas y reducir la producción de biomasa (*Munns, 2005*).

El tipo de suelo utilizado en este estudio fue un suelo arcilloso, con las características mostradas en la Tabla 18.

Tabla 18. Características del suelo (Fuente: Produced water reuse for irrigation of non-food biofuel crops: effects on switchgrass and reseed germination, physiology and biomass yield, elsevier, 2017).

Suelo	Arenas (%)	Arcilla (%)	Limos (%)	pH	Ec (ds/m)	Nitrato (NO ₃) [mg/l]	Fosforo (P) [mg/l]
	34	28	38	8.2	0.5	0.86	1.3

Análisis de resultados

Dentro de este artículo básicamente se evaluaron cinco características en los cultivos con respecto al tipo de agua utilizada una vez finalizado el experimento:

1. Tiempo de germinación.
2. Rendimiento de biomasa.
3. Longitud de crecimiento.
4. Concentración de sales en el suelo
5. Fuga de electrolitos foliares.

Tiempo de germinación

La germinación es el proceso mediante el cual un embrión (semilla) da por origen una planta. La germinación se inicia con la entrada de agua en la semilla (imbibición) y finaliza

con el rompimiento de la semilla y surgimiento de la raíz o planta. Por lo tanto, el proceso medido en tiempo para que la semilla germine se entiende como tiempo de germinación.

En este parámetro se midió el porcentaje y tasa de germinación en respuesta a los diferentes tipos de aguas tratadas. El experimento consistió en hacer germinar 25 semillas de cada especie estudiada para cada uno de los 5 tratamientos. Las semillas germinadas se contaron con una razón de intervalos de 2 días durante 21 días (porcentaje de germinación). Una semilla fue contada como germinada cuando la capa de la semilla fue quebrada y la raíz emergió. El porcentaje relativo de germinación (tasa de germinación) para cada tratamiento se calculó dividiendo el número de semillas germinadas en la solución de ensayo entre el número de semillas germinadas en la solución de control (agua de riego A).

En las Figuras 19 y 20 se observa el efecto que tiene el agua con alto contenido de sales y materia orgánica ya que en los casos del agua tipo C y D se aprecia una diferencia significativa en el con respecto al COT, si bien ambas muestras contienen la misma concentración de SDT el porcentaje y tasa de germinación se vieron afectados con una mayor concentración de COT ya que en la muestra D es mayor. Igualmente se destaca que en la muestra E con una concentración de 21,000 ppm de SDT y alto contenido de COT fueron muy pocas las semillas que se lograron germinar, teniendo un buen indicador para un posible uso con altos contenidos de contaminantes.

Tabla 19. Tasa de germinación a 21 días (Fuente: Produced water reuse for irrigation of non-foof biofuel crops: effects on switchgrass and repeseed germination, physiology and bomass yield, elsevier, 2017).

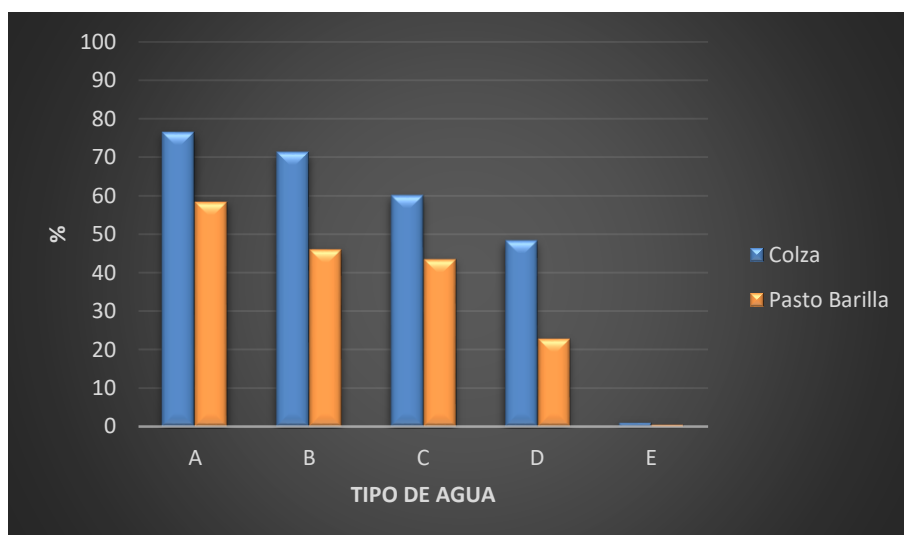
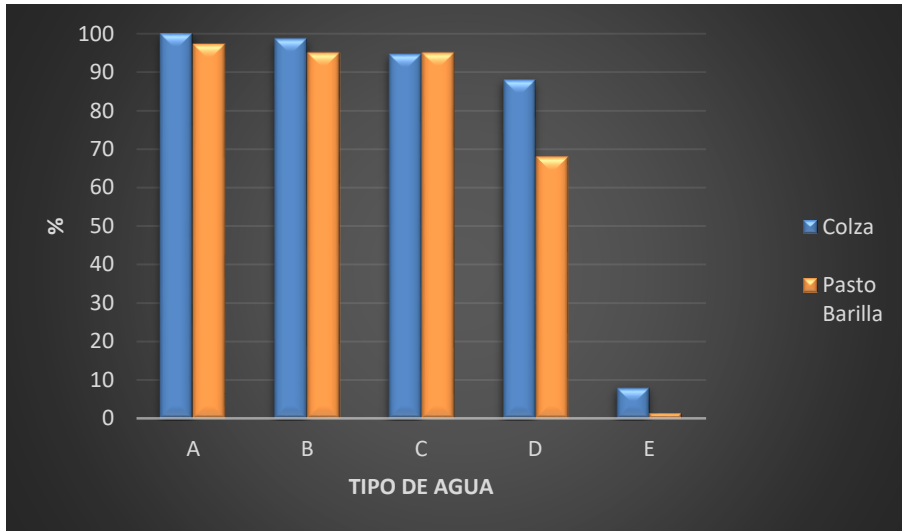


Tabla 20. Porcentaje de germinación a 21 días (Fuente: *Produced water reuse for irrigation of non-food biofuel crops: effects on switchgrass and reseed germination, physiology and biomass yield, elsevier, 2017*).



Rendimiento de biomasa.

La biomasa es aquella materia orgánica de origen vegetal o animal, incluyendo los residuos y desechos orgánicos, susceptible de ser aprovechada energéticamente. Las plantas transforman la energía radiante del sol en energía química a través de la fotosíntesis, y parte de esta energía queda almacenada en forma de materia orgánica.

La determinación de la biomasa es una de las variables más importantes en bioprocesos ya que nos lleva a la comprensión de la eficiencia del mismo. Se trata de una variable clave para establecer las tasas de producción, consumo de nutrientes en cualquier proceso biológico.

El periodo de crecimiento fue medido a los 106 días, todas las plantas se cortaron 2 cm por encima de la superficie del suelo, se pusieron en bolsas de papel, se secaron a 60 °C durante 48 h y se pesaron para determinar la biomasa.

El efecto de la calidad del agua sobre el crecimiento y la biomasa de colza se muestra en las Tablas 21 y 22. Todas las plantas sobrevivieron a todos los tratamientos hasta la cosecha. La colza y el pasto varilla tenían patrones de respuesta al crecimiento muy similares para las cuatro calidades de agua de riego producidas en comparación con el agua de control o de mejor calidad. Los parámetros de crecimiento de las plantas, incluyendo la biomasa y la altura de la planta se redujeron cuando las plantas fueron irrigadas con agua de riego E que contenía muy alta salinidad y contenido orgánico. Con

el aumento de la salinidad y la concentración de COT en agua de riego, la disminución de la biomasa y la altura en el pastizal fue mayor que en la colza. La proporción de la biomasa de (raíces / brotes) de colza aumentó con el aumento de la salinidad.

Las especies utilizadas y la calidad del agua no representó un impacto significativo para la altura de la planta, mientras que para el rendimiento de la biomasa el impacto si fue considerable.

La alta salinidad y los niveles de TOC del agua de riego E ($Ec = 34,4 [ds/m]$ y $TOC = 1352 [mg/l]$) afectaron significativamente el rendimiento de la biomasa del pasto, disminuyendo de $47 g$ con respecto al riego A. Este resultado fue similar a la respuesta observada para la colza con 86% de reducción de la biomasa. Es importante señalar que también hubo una diferencia significativa en la producción de biomasa (reducción del 30%) entre el agua de riego C y el agua de riego D. En otras palabras, cuanto mayor sea la concentración de materia orgánica (COT), menos biomasa se produjo. Esta diferencia significativa entre las dos aguas de riego muestra explícitamente la importancia del tratamiento y la eliminación de la materia orgánica en el agua producida.

Tabla 21. Biomasa medida a los 106 días (Fuente: *Produced water reuse for irrigation of non-food biofuel crops: effects on switchgrass and reseeded germination, physiology and biomass yield, elsevier, 2017*).

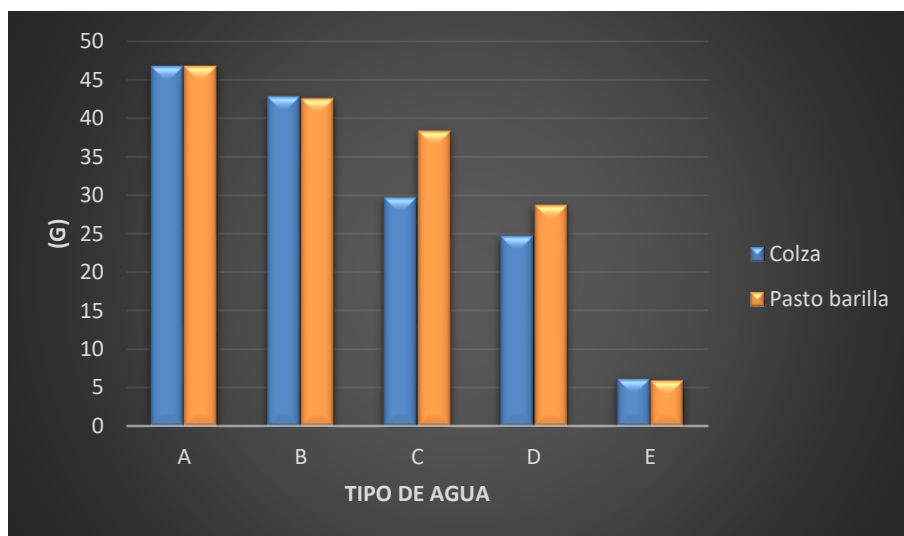
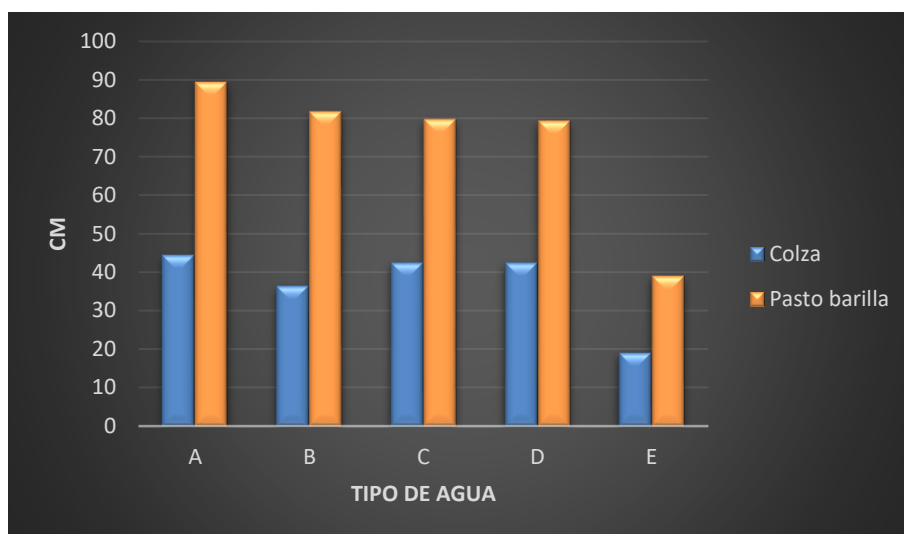


Tabla 22. Longitud medida a los 106 días (Fuente: *Produced water reuse for irrigation of non-food biofuel crops: effects on switchgrass and reseeded germination, physiology and biomass yield, elsevier, 2017*).



Las plantas tratadas con agua con la conductividad eléctrica más alta y COT (agua de riego E) fueron significativamente más cortas que aquellas irrigadas con todas las otras aguas.

Aunque el agua de riego B había experimentado más procesos de tratamiento y contenía menos salinidad y carbono orgánico total que el agua de riego C (Tablas 15, 16 y 17), no hubo diferencia significativa entre ambas en la altura de la planta y producción biomasa, por lo cual el agua de riego C puede ser suficiente tratamiento. Esta observación es de importancia en la reutilización de agua producida en el riego de cultivos de biocombustibles no alimentarios como la colza y el pasto varilla. Además, establecer requisitos de tratamiento para el agua producida debe basarse en la eliminación de sales y de materia orgánica, debido a la influencia significativa de la concentración de TOC del agua de riego en la salud de las plantas y los parámetros fisiológicos y el rendimiento de la biomasa.

Con base en las características fisiológicas del pastizal y la colza y el estudio de germinación, se puede concluir que el cultivo de colza era más tolerante al agua producida de mala calidad que el pasto y la producción de biomasa no fue afectada por la calidad del agua de riego. Esta es una observación importante, ya que la aplicación de agua producida para riego se está evaluando en múltiples áreas para su reutilización como fuente de riego. De acuerdo con estos resultados, los procesos de tratamiento que proporcionen la eliminación de COT a menos de 5 [mg/l] son necesarios para el riego de cultivos de biocombustibles no alimentarios con agua producida relacionada con el fracturado hidráulico.

Crecimiento de las plantas

Consiste en el crecimiento en longitud de la planta, el cual varía al tipo de planta y condiciones donde se encuentra. Las semillas fueron sembradas a mediados de diciembre de 2015 y las plantas fueron cosechadas en la primera semana de abril de 2016. Se estudiaron un total de 30 macetas de las cuales 15 de ellas contenía semillas de colza y las 15 restantes de pasto varilla. Durante las primeras cinco semanas después de la siembra, las macetas fueron irrigadas únicamente con el agua del mejor escenario (Tipo A). Para el resto del experimento, las plantas fueron irrigadas los diferentes tipos de aguas tratadas mencionadas anteriormente. La frecuencia de irrigación fue de tres veces por semana.

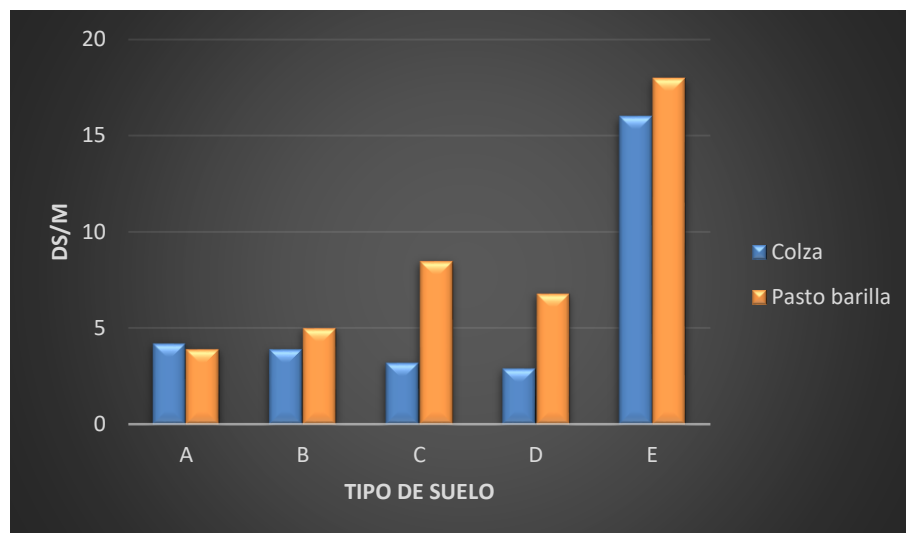
Al final de los experimentos del día 106, se realizaron mediciones fisiológicas sobre los brotes cosechados y sobre la biomasa de ambas especies. La supervivencia, la altura, el crecimiento y la biomasa de las plantas se midieron para cada maceta.

Concentración de sales en el suelo

La conductividad eléctrica del suelo se midió al final del ciclo de crecimiento (día 106) una vez finalizada la cosecha y se representó frente al tipo de calidad del agua de riego (A-E) para cada uno de los cinco tratamientos (Tabla 23). La Ec del suelo aumentó en comparación con las mediciones iniciales del suelo recogidas antes de iniciar los experimentos (Tabla 18).

Al final de los 106 días, la EC de muestras de suelo de los cinco tratamientos (incluido el control) fue mayor que la EC de suelo virgen ($0,5 [ds/m]$, Tabla 18). La acumulación de sal en los suelos de semillas de colza y pasto era relativamente baja y estable, excepto en el caso del agua de riego E. Evidentemente la EC máxima del suelo se observó en el agua de riego E tanto para la colza como para el pasto a 16 y $18 [ds/m]$, respectivamente ya que era el tipo de agua con concentraciones más altas de sales y carbono orgánico total.

Tabla 23. Conductividad del suelo a 106 días (Fuente: *Produced water reuse for irrigation of non-foof biofuel crops: effects on switchgrass and repeseed germination, physiology and bomass yield, elsevier, 2017*).



Fuga de electrolitos foliares

Comúnmente, los electrolitos existen como soluciones de ácidos, bases o sales. Es un material que se disuelve completa o parcialmente en agua para producir una solución que conduce una corriente eléctrica. Debido a que generalmente consisten en iones en solución, los electrolitos también son conocidos como soluciones iónicas.

Según el Instituto Nacional de la Salud de los Estados Unidos, el calcio, el cloruro, el magnesio, el fósforo, el potasio, y el sodio son los electrolitos más comunes. Según el Departamento de Agricultura de Carolina del Norte, los nutrientes de las plantas incluyen fósforo y potasio como nutrientes primarios, calcio y magnesio como nutrientes secundarios y cloruro como un micronutriente.

La fuga de electrolitos foliares es un buen indicador de la respuesta de la planta a un estrés ambiental. La medición de este fenómeno se utiliza comúnmente para evaluar la tolerancia de la planta a condiciones de estrés tales como corrientes de aire, temperaturas adversas y salinidad. Este proceso se realiza en laboratorio y es medida mediante conductividad eléctrica (Ec).

La fuga de electrolitos foliares (EL) se midió de acuerdo a las hojas maduras de ambas especies. Se cortaron en segmentos de 2 cm, después de ser enjuagado tres veces con agua destilada, se colocaron 0,2 g de segmentos de hojas en un tubo de plástico que

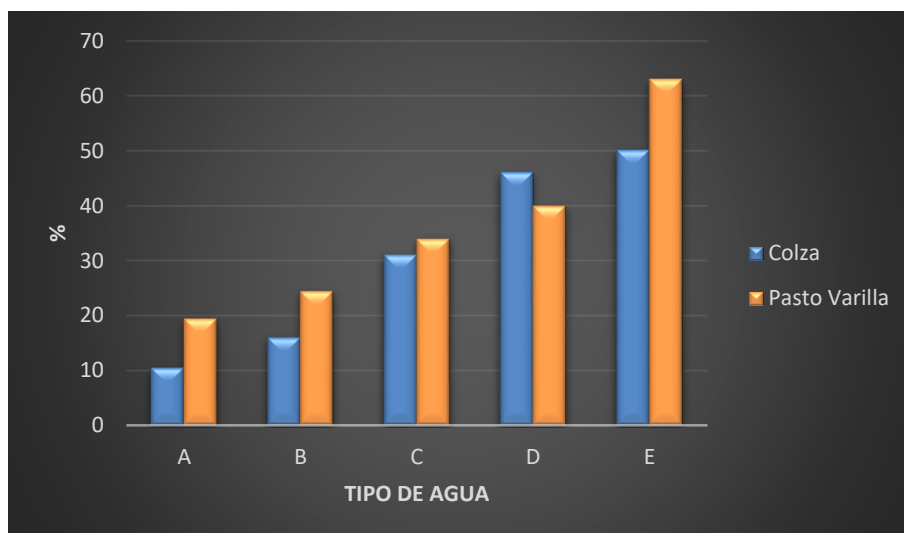
contenía 20 *ml* de agua destilada. Los tubos de ensayo se agitaron sobre un agitador durante 24 horas y se midió la conductividad de la disolución (C_1). Las muestras de hojas se indujeron a 120 °C durante 30 *min*, y se midió nuevamente la conductividad de las soluciones que contenían tejido muerto (C_2). El porcentaje de (EL) se calculó con la relación:

$$\%El = \frac{C_1}{C_2}$$

De acuerdo con los resultados mostrados en la Tabla 24, la pérdida de electrolitos foliares de ambas plantas analizadas resultó en un aumento al incrementar la salinidad y la concentración de COT del agua. Las cuatro calidades de agua producidas dieron como resultado valores de (EL) significativamente más altos que el agua tipo A. Sin embargo, la (EL) fue significativamente menor para el pastizal con 28,5%, comparado con el 35,5% de la colza. Al final de la temporada de riego, (EL) para el agua de riego E fue entre 3 y 5 veces mayor al nivel del agua del mejor escenario. El alto contenido orgánico del agua de riego D en relación con el agua de riego C aumentó significativamente la (EL) en las especies de semilla de colza y pasto, lo que muestra mayor daño a las membranas celulares por esta condición de estrés por altas cargas orgánicas).

Los valores de electrolitos foliares disminuyeron significativamente del agua de riego A al agua de riego E. Basándose en la concentración alta de COT, se puede concluir que fue un factor de estrés que da como resultado un mayor daño en las membranas celulares y, en última instancia, valores de (EL) más altos.

Tabla 24. Fuga de electrolitos foliares (Fuente: *Produced water reuse for irrigation of non-food biofuel crops: effects on switchgrass and reseeded germination, physiology and biomass yield, elsevier, 2017*).



Como se mostró en este experimento citado es importante conocer las características del agua a utilizar para el posible riego en alguna especie vegetal, ya que esta se ve afectada significativamente en su crecimiento.

Igualmente se destaca que la selección de una planta resistente a la salinidad será fundamental para que se puedan tener buenos resultados.

Capítulo 6. Factibilidad para el uso del agua en México

6.1. Sequía en México

En la actualidad la sequía es uno de los problemas que más daños está provocando en la sociedad mexicana, principalmente en el norte del país, donde históricamente se presenta dicho fenómeno meteorológico. La sequía es un fenómeno natural cuya característica principal es la ausencia o la disminución de precipitaciones pluviales durante un periodo que se estima lluvioso, y esta mengua en la cantidad de agua existente y disponible para el abasto humano desencadenando una serie de dificultades derivadas de la escasez del líquido que finalmente crea conflictos y desastres sociales.

En nuestro país estos fenómenos ocurren en promedio cada 20 años, y cuando se presentan, provocan un desbalance hídrico en el ciclo del agua, pues la disponibilidad del recurso es insuficiente para satisfacer las necesidades de los seres vivos. Una sequía puede durar en promedio de uno a tres años, y termina cuando las lluvias regresan y se recupera el índice normal de precipitación y se restablece el funcionamiento de los cuerpos de agua.

La sequía se clasifica principalmente en tres tipos:

1. Meteorológica.
2. Agrícola.
3. Hidrológica.

Todos los tipos de sequía tienen origen en la misma causa: la falta de lluvias, por tanto, cuando únicamente se toma en cuenta la lluvia, estamos hablando de la sequía meteorológica. Es a este tipo de sequía a la que se le atribuye el inicio del desequilibrio hidrológico, pues es cuando se percibe una interrupción en el temporal por una o más estaciones; este tipo de sequía es difícil de precisar, puesto que sus efectos o incidencia son diferentes dependiendo del lugar donde ocurra; por ejemplo, en Bali la sequía meteorológica se define como "el periodo con ausencia de lluvia en seis días", mientras que en España se considera como sequía meteorológica un periodo que puede alcanzar hasta dos años consecutivos sin precipitaciones.

La sequía agrícola, por su parte, se suscita después de una sequía meteorológica, y ocurre cuando no existe humedad suficiente en el terreno para el cultivo determinado en un

momento particular de tiempo. La sequía agrícola afecta principalmente a la agricultura, pues el terreno, por la falta de lluvias, las altas temperaturas y la evaporación, pierde totalmente su humedad normal, impidiendo con ello el desarrollo exitoso de cualquier plantío.

En México 77% del agua se utiliza en la agricultura, 14% para abastecimiento público, 5 % para generación de energía por medio de plantas termoeléctricas y 4 % para la industria.

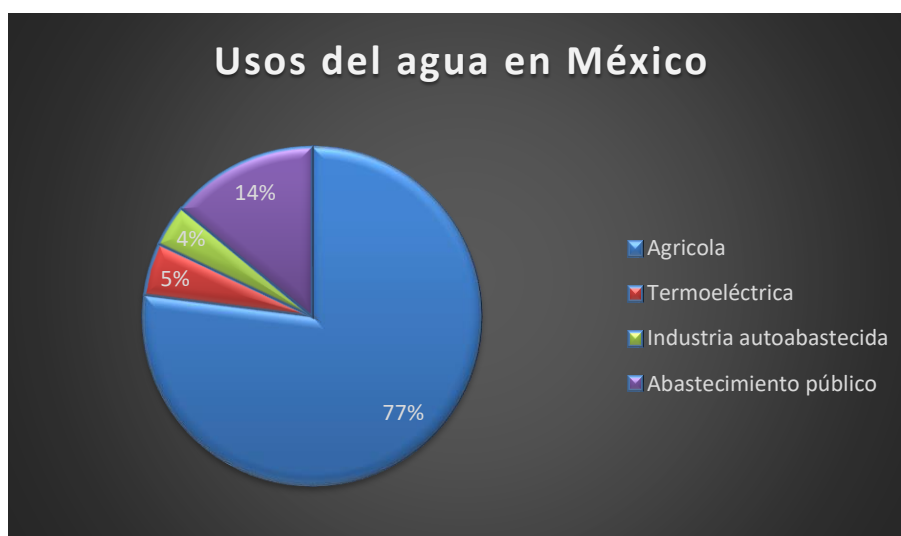


Figura 24. Usos del agua en México (Fuente: Estadísticas del Agua en México, CONAGUA, 2015).

Por último, se dice hay una sequía hidrológica cuando por la falta de lluvias durante una o más estaciones el nivel de los ríos, lagos y demás embalses superficiales y subterráneos comienza a bajar paulatinamente, incluso hasta agotarse por completo.

Dos terceras partes del territorio son desérticas o semidesérticas, la ubicación de la población no corresponde con las zonas de mayor disponibilidad natural de agua. La Comisión Nacional del Agua ha publicado en el Diario Oficial de la Federación (58 publicaciones de 2003 a 2009) la disponibilidad de las 722 cuencas que integran su territorio (Figura 26), donde puede notarse que son las cuencas Sonora Norte, Sonora Sur, Cuencas Cerradas del Norte, Río Bravo, Lerma Chapala y Río Balsas las que no cuentan con disponibilidad de agua, y la mayoría de ellas están incluso en déficit.

Tabla 25. Especies tolerantes a la salinidad en México

Nombre	Tolerancia a la salinidad en ppm *	Usos	Ubicación en México
Distichlis spicata (zacate salado)	22,400	Como forraje.	Coahuila, Distrito Federal, Durango, Hidalgo, Estado de México, Michoacán, Nayarit, Oaxaca, Puebla, San Luis Potosí, Sinaloa, Tabasco, Tamaulipas, Tlaxcala, Veracruz, Yucatán y Zacatecas.
Sporobolus virginicus	22,400	Forraje	Campeche, Quintana Roo, Yucatán
Paspalum vaginatum	16,000	Conservador de suelos, cobertura de parques, planta ornamental, campos de golf.	Campeche, Quintana Roo, Yucatán, Baja California Sur, Chiapas, Guanajuato, Colima, Jalisco, México, Michoacán, Nayarit, Oaxaca, Puebla, Querétaro, San Luis Potosí, Tabasco, Tamaulipas, Veracruz y Zacatecas
Panicum virgatum (Pasto varilla)	14,000	Conservación de suelos, producción forrajera, cobertura de parques, como planta ornamental, como cultivo de biomasa para producir calor, etanol, fibra, electricidad.	Veracruz, Campeche, Quintana Roo, Yucatán.
Brassica napus (Colza)	3600	Forraje, aceite vegetal para consumo humano, biodiésel y alimento para el ganado.	Sonora, Tamaulipas, Sinaloa, Chihuahua, Durango, Jalisco, Tlaxcala, Puebla, Estado de México, Michoacán, Guanajuato, Hidalgo, San Luis Potosí

*Tolerancia reduciendo hasta un 50% su crecimiento.

Aprovechando estas aportaciones, se localizaron cada una de estas especies en el territorio mexicano para así poder conocer los alcances que podría tener un proyecto de estas características y la posibilidad de reutilizar el agua en zonas donde se encuentren cultivos cercanos a las actividades petroleras en México, como se evidencia en la Figura 26.



Figura 26. Ubicación de especies tolerantes a la salinidad y actividad petrolera en México (Fuente: Instalaciones petroleras, CNH, 2018).

Como puede observarse, las actividades petroleras se desarrollan a lo largo del golfo de México y parte del noroeste del país, la localización de las especies presentadas en el cuadro 25 resulta más factible ya que a excepción de la planta de colza, existen cultivos cercanos de estas especies en donde podrían utilizarse estas aguas residuales.

6.3. Arreglo de una planta tratadora

Con base en las tecnologías disponibles presentadas en el Capítulo 4 y tomando en cuenta únicamente en las ventajas y efectividad de eliminación de contaminantes que cada sistema posee, se propone un arreglo desde el tratamiento primario hasta el terciario que nos pueda garantizar una correcta separación de los contaminantes presentes en la muestra de agua residual presentada en el Capítulo 5.

El principal problema presente en esta muestra se encuentra en el contenido de sólidos disueltos totales, el cual representa básicamente la sumatoria de las sales presentes. Cabe resaltar que no fue posible obtener una caracterización más amplia de metales pesados, ya que elementos como el Cadmio (*Cd*), Mercurio (*Mg*), Plomo (*Pb*) y Arsénico (*Ar*) son metales que impactan de forma significativa en las plantas, los cuales deben ser considerados para un estudio aplicado.

6.3.1. Tratamiento primario propuesto

Dentro del tratamiento primario debemos asegurarnos de eliminar los sólidos suspendidos en el agua, los cuales pueden estar asociados en el agua una vez terminado el proceso de separación de los hidrocarburos, en ella se pueden presentar sólidos directamente del yacimiento explotado por lo cual es conveniente hacer pasar el líquido por un tratamiento de cribado, para posteriormente dejarlo en un tanque de sedimentación finalizando por una etapa de flotación.

De esta manera:

1. Asegura la eliminación de más del 60% de los sólidos en suspensión.
2. Eliminación aceite residual aún presente.
3. Eliminación de gases en el agua ya que se somete a un proceso de aireación en la etapa de flotación.
4. Reducción de carga orgánica (demanda bioquímica de oxígeno).
5. Mayor calidad de los efluentes para iniciar con procesos posteriores.

6.3.2. Tratamiento secundario propuesto

El objetivo primordial de esta etapa es eliminar compuestos orgánicos e inorgánicos presentes en el agua, es importante mencionar que la caracterización de la muestra obtenida no tiene un dato relevante que pueda funcionar como parámetro de niveles de materia orgánica como la demanda bioquímica de oxígeno. Dado que el destino final de esta agua sería para irrigación, la eliminación de nutrientes como nitrógeno y fósforo, que son escasos en los ecosistemas será fundamental para evitar la eutrofización o enriquecimiento de nutrientes que propicia el crecimiento de organismos que no son benéficos en ciertos ambientes, por ejemplo, algunos tipos de algas.

Una vez asegurada la eliminación de sólidos en la etapa primaria, para el tratamiento secundario se propone utilizar un sistema biológico de membranas, que básicamente es una combinación de un proceso de lodos activados aplicando membranas para la filtración del agua.

De esta manera:

1. Con el proceso de lodos activados, elimina gran parte de los nutrientes que propician la eutrofización.
2. Se garantiza la remoción de gran cantidad de materia orgánica.
3. Se obtiene una mayor calidad del efluente ya que las membranas proporcionarían una etapa extra de filtración.
4. Se reducirían los espacios requeridos puesto que el tratamiento de lodos activados requiere una etapa de decantación de los lodos en un sedimentador, el cual no es requerido en este sistema.

6.3.3. Tratamiento terciario propuesto

Debido al alto contenido de SDT de la muestra (48,000 ppm aproximadamente) es necesario implementar un tratamiento que garantice la eliminación de materia inorgánica perjudicial en la planta a irrigar como se evidenció en el capítulo anterior. La selección del proceso adecuado será fundamental ya que se le considera la etapa final de separación.

Una vez finalizado el tratamiento secundario, se propone la implementación de un tratamiento por ósmosis inversa para finalizar con una etapa de desinfección sometiendo al agua mediante un proceso de rayos ultravioleta.

De esta manera:

1. Se garantiza eliminar a los sólidos disueltos hasta niveles que se deseen ya que la efectividad del sistema excelente.
2. La ósmosis inversa puede eliminar nutrientes orgánicos que podrían estar aún presentes en el agua.
3. Eliminación de organismos patógenos presentes en el agua.
4. Mediante la desinfección por rayos ultravioleta se elimina la necesidad de usar alguna sustancia química que sea tóxica para la planta a irrigar.
5. Ya que no se utilizan productos químicos peligrosos para la desinfección: se elimina la implementación de un proceso adicional, como una descoloración, por citar un ejemplo, que sería necesario implementando un tratamiento con cloro.
6. Con la combinación de osmosis inversa y desinfección mediante rayos ultravioleta se simplifican los procesos realizados en la planta, por ser considerados sistemas fáciles de operar.
7. Se reducen los espacios requeridos para las instalaciones.

Finalmente, en la Figura 27 se muestra el diagrama de proceso que conllevaría esta planta de tratamiento, dividido en las 3 etapas de separación descritos anteriormente.

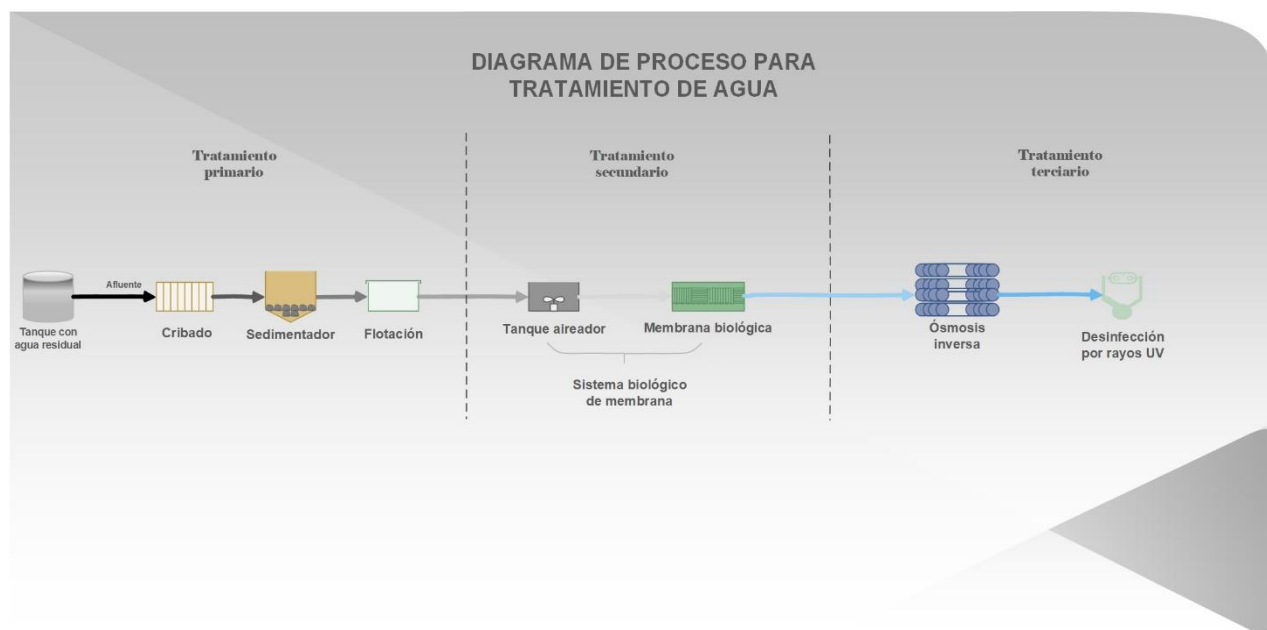


Figura 27. Diseño de proceso propuesto para tratamiento de aguas residuales

Un arreglo con estas características, teóricamente puede funcionar para el tratamiento de aguas asociadas a la producción de hidrocarburos; sin embargo, es importante mencionar que un arreglo dependerá de las características del efluente que se requiera y las condiciones de agua a tratar, sin mencionar el alcance económico del proyecto.

Conclusiones

Con este trabajo, se demostró que es posible aprovechar agua congénita resultado de la explotación petrolera ya que existen las tecnologías disponibles para el tratamiento de agua con altos niveles de contaminantes. La aplicación de cada uno de los sistemas expuestos en esta investigación dependerá de las condiciones iniciales del agua, por lo cual, una correcta caracterización del fluido será fundamental para hacer o no factible un proyecto de estas características.

Se evidenció que no es necesario tener niveles de calidad muy altos del efluente final ya que existen diversas especies vegetales en México con diferentes usos que pueden ser irrigadas con niveles de salinidad relativamente elevados, significando esto una reducción en el costo de tratamiento.

La factibilidad o no de un proyecto de estas características en México depende de factores económicos, políticos y sociales, puesto que se deben de combinar las necesidades de una sociedad por un recurso tan vital como es el agua. Una política más estricta por parte del país en el tema del uso adecuado del agua representaría que empresas privadas se interesaran más en invertir en este tipo proyectos.

Debido a que los métodos de desecho del agua que se llevan a cabo en la industria petrolera, como la reinyección al subsuelo, por citar un ejemplo, significan costos significativamente menores comparados con los de un tratamiento para poder reutilizar esta agua, ha hecho que no se considere como una opción viable.

Actualmente la demanda de agua potable, no solo en México, sino a nivel mundial es cada vez mayor por la explosión demográfica que estamos afrontando, por lo cual, los gobiernos están buscando alternativas y/o soluciones para poder abastecer a sus habitantes, debido a ello este residuo podría convertirse en una fuente importante agua ya que los volúmenes de agua en superficie en un campo petrolero pueden ser muy altos.

Como industria petrolera, somos responsables de los impactos ambientales que significa la extracción de hidrocarburos, de ahí la importancia de buscar nuevas formas de minimizar, en medida de lo posible, este impacto, implementar nuevas tecnologías en el aprovechamiento de nuestros residuos puede ser una de ellas.

Recomendaciones

Para un estudio aplicado, es necesario caracterizar correctamente el yacimiento de donde se obtiene el agua congénita ya que factores como, profundidad del yacimiento, tipo de roca y tipo de fluido extraído cambiarán las características del afluente a medida que se va obteniendo el agua en superficie, lo cual significaría una mala caracterización del agua y por ende una selección de equipo tratador ineficiente.

Es importante realizar un estudio adecuado de las especies vegetales a irrigar ya que de ella dependerá el nivel de pureza que necesitará nuestro efluente final, al igual que al ecosistema que a ella la rodea.

Dar a conocer a los estudiantes de Ingeniería Petrolera desde las aulas los impactos ambientales que dan como resultado de las operaciones de extracción de hidrocarburos, podría dar pauta nuevas oportunidades en temas relacionados a este.

Referencias bibliográficas

HALLIBURTON, "WATER MANAGEMENT MANUAL", HALLIBURTON COMMUNICATIONS, U.S.A., 2002.

TAREK AHMED, "RESERVOIR ENGINEERING HANDBOOK", ELSEVIER, 2010.

B.C. CRAFT AND M.F HAWKINS, "APPLIED PETROLEUM RESERVOIR ENGINEERING", PRENTICE HALL PTR, 1991.

ARNOLD RICHARD, BURNETT DAVID B., ELPHICK JON, FEELEY THOMAS J. III, GALBRUN MICHEL, HIGHTOWER MIKE, "MANEJO DE LA PRODUCCION DE AGUA: DE RESIDUO A RECURSO", OILFIELD REVIEW, 2004.

BAILEY BILL, CRABTREE MIKE, TYRIE JEB, JON ELPHICK, KUCHUK FIKRI, ROMANO CHRISTIAN, ROODHART LEO, "CONTROL DE AGUA", OILFIELD REVIEW, 2000.

MEDHAT ABDOU, ANDREW CARNEGIE, S. GEORGE MATHEWS, MICHAEL O'KEEFE. BHAVANI RAGHURAMAN.WEI WEI. CHENG GANG XIAN, "VALOR DEL AGUA DE FORMACIÓN", OILFIELD REVIEW, 2011.

BP, "STATISTICAL REVIEW OF WORLD ENERGY", 2017.

J. GUILLERMOT, "GEOLOGIA DEL PETROLEO", Paraninfo, 1982.

MIGUEL PEREZ, "TRATAMIENTO DE AGUA CONGÉNITA EN INSTALACIONES COSTA AFUERA" CAYROS GROUP, 2017.

JAVIER SÁNCHEZ URIBE, TESIS: "TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN FINAL DEL AGUA PRODUCIDA EN YACIMIENTOS PETROLEROS", UNAM, 2013.

ANASTACIO HERNÁNDEZ MONTIEL, TESIS: "IDENTIFICACIÓN DEL ORIGEN Y CONTROL DEL AGUA PRODUCIDA", UNAM, 2010.

PETIA MIJAYLOVA NACHEVA, PETER BIRKLE, ESPERANZA RAMÍREZ CAMPEROS, LUCIANO SANDOVAL YOVAL, "TRATAMIENTO DE AGUAS DE LA DESALACIÓN DEL PETRÓLEO PARA SU APROVECHAMIENTO EN INYECCIÓN AL SUBSUELO", INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA.

APREL, "GUIA PARA LA DISPOSICION Y EL TRATAMIENTO DE AGUA PRODUCIDA".

MIGUEL ÁNGEL LOZADA AGUILAR, JORGE ALBERTO HERRERA RODRÍGUEZ, SALVADOR FLORES MONDRAGÓN Y CESAR BERNAL HUICOCHEA, "PRUEBAS

TECNOLÓGICAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS CONGÉNITAS SUBPRODUCTO DE LA DESHIDRATACIÓN DE PETRÓLEO CRUDO PESADO EN PLATAFORMAS MARINAS”, CONGRESO MEXICANO DEL PETROLEO, 2013.

“LEY DE AGUAS NACIONALES”, DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN EL 1º DE DICIEMBRE DE 1992.

“LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLÓGICO Y LA PROTECCIÓN AL AMBIENTE”, DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN EL 28 DE ENERO DE 1988.

“NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-001-SEMARNAT-1996”, DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN EL 6 DE ENERO DE 1997.

“NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-143-SEMARNAT-2003”, DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN EL 6 DE ENERO DE 2004.

R.S. RAMALHO, *“TRATAMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES”*, REVERTÉ, S.A., 1993.

KENNETH E. ARNOLD, *“FACILITIES AND CONSTRUCTION ENGINEERING”*, SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS, 2007.

UBALDO BONILLA D., *“TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES”*, CENTRO DE EDUCACION CONTINUA, FI, UNAM.

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA, *“MANUAL DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO”*, 2007.

JOSEPH CHARPENTIER, *“TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON LODOS ACTIVADOS”*, INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGÍA INDUSTRIAL, 2014.

“OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON EL PROCESO DE LODOS ACTIVADOS”, COMISIÓN ESTATAL DEL AGUA DE JALISCO, .

CONAGUA, *“MANUAL DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES: PRETRATAMIENTO Y TRATAMIENTO PRIMARIO”*.

MARÍA TERESA LEAL ASCENCIO, *“SOLAR SAFE WATER”*, INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA.

IMP, *“ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO DE LA FASE ACUOSA DE UNA MUESTRA DE AGUA CONGENITA”*, LABORATORIO DE PRODUCCIÓN DE HIDROCARBUROS Y CONTROL DE LA CORROSIÓN, 2017.

NANSY MONICA SANCHEZ CASAS, *“ANÁLISIS COMPOSICIONAL DE AGUA CONGENITA DE UNA MUESTRA”*, 2017

K.B. MARCUM, *“USE OF SALINE AND NON-POTABLE WATER IN THE TURFGRASS INDUSTRY; CONSTRAINTS AND DEVELOPMENTS”*, ELSEVIER, 2005.

D. PASTERNAK, A. NERD, Y. DE MALACH, *“IRRIGATION WITH BRACKISH WATER UNDER DESERT CONDITIONS: IX. THE SALT TOLERANCE OF SIX FORAGE CROPS”*, ELSEVIER, 1993.

EFFI TRIPLER, URI SHANI, YECHEZKEL MUALEM, ALON BEN-GAL, *“LONG-TERM GROWTH, WATER CONSUMPTION AND YIELD OF DATE PALM AS A FUNCTION OF SALINITY”*, ELSEVIER, 2011.

S.F. ALSHAMMARY, Y.L. QIAN, S.J. WALLNER, *“GROWTH RESPONSE OF FOUR TURFGRASS SPECIES TO SALINITY”*, ELSEVIER, 2003.

NASIM E. PICA, KEN CARLSON, JEFFREY J. STEINER, REAGAN WASKOM, *“PRODUCED WATER REUSE FOR IRRIGATION OF NON-FOOD BIOFUEL CROPS: EFFECTS ON SWITCHGRASS AND REPESEED GERMINATION, PHYSIOLOGY AND BIOMASS YIELD”*, ELSEVIER, 2017.

HAMLET CHIRINOS U., INFORMACIONES AGRONOMICAS, ARTICULO: *“¿ES SU AGUA DE RIEGO ADECUADA PARA LOS CULTIVOS?”*, INSTITUTO DE LA POTASA Y EL FOSFORO, 1999.

JOSE MANUEL PITA VILLAMIL, FELIX PEREZ GARCIA, *“GERMINACION DE SEMILLAS”*, MINISTERIO DE AGRICULTURA PESCA Y ALIMENTACIÓN.

SANTIAGO GARCIA GARRIDO, *“CENTRALES TERMoeLECTRICAS DE BIOMASA”*, RENOVOTEC, 2012.

CDR ASSOCIATES, *“PRODUCED WATER BENEFICIAL USE DIALOGUE: OPPORTUNITIES AND CHALLENGES FOR RE-USE OF PRODUCED WATER ON COLORADO’S WESTERN SLOPE”*, 2014.

MOHAMMAD PESSARAKLI, *“HANDBOOK OF PLANTS AND CROP STRESS”*, Marcel Dekker, Inc, 1999.

COMISION NACIONAL DEL AGUA, *“ESTADÍSTICAS DEL AGUA EN MÉXICO”*, 2015.

ACADEMIA MEXICANA DE CIENCIA, *“EL AGUA EN MÉXICO: CAUCES Y ENCAUCES”*, 2010.

MIGUEL ESPARZA, *“LA SEQUÍA Y LA ESCASEZ DE AGUA EN MÉXICO. SITUACIÓN ACTUAL Y PERSPECTIVAS FUTURAS”*, SCIELO, 2014.

CARMEN ARNÁIZ, LAURA ISAC, JULIAN LEBRATO, *“DETERMINACIÓN DE LA BIOMASA EN PROCESOS BIOLÓGICOS”*, UNIVERSIDAD DE SEVILLA.

JUAN JAVIER ORTIZDÍAZ, ITZIAR ARNELAS, ROSA CERROS TLATILPA, MARÍA ELENA SIQUEIROS DELGADO, JUAN TUN GARRIDO, *“EL GÉNERO PASPALUM L. (PASPALAEAE, POACEAE) EN LA PENÍNSULA DE YUCATÁN, MÉXICO”*, 2015.

J. ALBERTO ARELLANO RODRÍGUEZ, JOSÉ SALVADOR FLORES GUIDO, JUAN TUN GARRIDO, MARÍA MERCEDES CRUZ BOJÓRQUEZ, *“NOMENCLATURA, FORMA DE VIDA, USO, MANEJO Y DISTRIBUCIÓN DE LAS ESPECIES VEGETALES DE LA PENINSULA DE YUCATÁN”*, UAY, 2003.

Páginas de internet

SCHLUMBERGER , OILFIELD GLOSSARY EN ESPAÑOL,
<http://www.glossary.oilfield.slb.com>

SEMARNAT, <https://www.gob.mx/semarnat>

CONAGUA, <https://www.gob.mx/conagua>

PROFEPA, <https://www.gob.mx/profepa>

ASEA, <https://www.gob.mx/asea>

CONABIO, GUIA DE PLANTAS SILVESTRES EN MEXICO, <https://www.gob.mx/conabio>

INATURALIST, <https://www.inaturalist.org>

CYCY, <http://www.cicy.mx>

NATURALISTA, <http://www.naturalista.mx>

COMITÉ NACIONAL SISTEMA PRODUCTO OLEAGINOSAS,
<http://www.oleaginosas.org>

MAPA INSTALACIONES PETROLERAS CNIH
https://portal.cnih.cnh.gob.mx/iicnih2/?lng=es_MX