



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESTADO DEL ARTE DEL REÚSO INDIRECTO Y SUS  
PERSPECTIVAS DE APLICACIÓN EN MÉXICO**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO CIVIL**

**P R E S E N T A:  
YESICA MARTÍNEZ CIRILO**

**DIRECTORA DE TESIS:  
DRA. ALMA CHÁVEZ MEJÍA**



**México, Ciudad de México, 2016**  
Ciudad Universitaria, CDMX



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA  
COMITÉ DE TITULACIÓN  
FING/DICyG/SEAC/UTIT/024/16

Señorita  
YESICA MARTÍNEZ CIRILO  
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso la profesora DRA. ALMA CHÁVEZ MEJÍA, que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

**"ESTADO DEL ARTE DEL REÚSO INDIRECTO Y SUS PERSPECTIVAS DE APLICACIÓN EN MÉXICO"**

- INTRODUCCIÓN
- I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA
- II. MARCO TEÓRICO
- III. OBJETIVOS
- IV. METODOLOGÍA
- V. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS
- VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
- REFERENCIAS

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"  
Cd. Universitaria a 14 de marzo del 2016.  
EL PRESIDENTE

M.I. GERMÁN LÓPEZ RINCÓN

GLR/MTH\*gar.

## RESUMEN

En esta tesis, se analiza la problemática existente sobre la escasez de agua y la sobreexplotación de las fuentes de abastecimiento de agua potable en México y en el contexto global. Así mismo, se presenta la situación internacional y nacional con respecto al grado de presión hídrica, la generación de agua residual, su tratamiento y su reúso.

Con el objeto de proponer y potencializar el reúso potable indirecto del agua en México, se presenta un apartado sobre el estado del arte de este reúso desde la perspectiva internacional. Se enfatiza el hecho de cómo la implementación del reúso de agua renovada ha podido atenuar los problemas hídricos mediante el empleo de tecnología para potabilización a base de barreras múltiples con la finalidad de garantizar la calidad deseada poniendo como marco de referencia ocho casos de estudio exitosos.

Además, se comparan los criterios internacionales con las normas nacionales que el agua destinada para el reúso potable indirecto debe cumplir.

Finalmente, con base en el estudio realizado por el grupo de trabajo donde se plantean 15 zonas potenciales en el país para promover el reúso potable indirecto, se proponen dos sistemas a base de barreras múltiples, cuyo componente principal es el uso de membranas, que podrán incorporarse a la infraestructura de tratamiento a nivel secundario ya existente en el país.

## AGRADECIMIENTOS

A dios, por bendecirme en cada momento de la vida.

A mis padres, a ellos por darme la vida, por soportar todos mis caprichos, rebeldías y decisiones, por ayudarme a levantar en cada caída y tropezón, a ellos les dedico mi más grande éxito hasta el momento, porque lo hicimos juntos.

A la UNAM por haberme permitido formar parte de la máxima casa de estudios, la cual se ha convertido desde el año 2007 en mi segundo hogar.

A la Facultad de Ingeniería y al Instituto de Ingeniería, por permitirme conocer a personas que me transmitieron conocimientos y experiencia.

A mi tutora de tesis, la Dra. Alma Chávez, por su paciencia, comprensión, por transmitirme sus conocimientos y por brindarme el apoyo para desarrollar este trabajo de investigación.

A Gaby, por siempre confiar en mí, por escucharme y brindarme su más sincera amistad.

A Diana González, Víctor Robledo, Vannesa Bonifacio y Raymundo Ramos, por acompañarme y brindarme su amistad durante todo este tiempo, a ellos porque emprendimos un sueño desde ENP5 “José Vasconcelos”.

A mis amigos, a quienes conocí en la tan apreciable y querida Facultad de Ingeniería, Cristian González, Alejandro Landin, Etzael Pastrana, David Pérez, Jorge Moreno, Iván Cortes, Mónica Villa, David Crisanto, Julio Chávez, Gerardo Hernández, Israel Mancilla y Mauricio Anaya, a ellos por hacer ameno el trayecto, en cada clase, en cada viaje, en cada fiesta.

A mis profesores, que admiro y respeto, Cristian González, Aida Medina, Nikte Ocampo, Miguel Ángel Rodríguez, Luis Humberto Soriano, Raquel Avalos, Raúl Verduzco, Carlos Villaseñor, Agustín Demenegui, Aburto Valdez, Roberto Duran y Erika Guzmán, por transmitirme sus conocimientos, porque gracias a ellos y a todos los profesores que me dieron clase durante la carrera, pude formarme como Ingeniera Civil.

A Energías Alternas, Estudios y proyectos S.A. de C.V. por darme la oportunidad de trabajar en su equipo, porque comencé a desempeñarme en la vida laboral. Principalmente agradezco al Ing. Carlos Piña, por confiar en mí, y por compartir sus conocimientos, además de ayudarme a confiar en mi misma.

A TECSA e IACMEX que desde Abril de 2016 me dio la oportunidad para unirme a su equipo de trabajo, principalmente agradezco al Ingeniero Agustín Becerril por la oportunidad y la confianza que me ha brindado desde el primer día de trabajo.

A las personas que no creyeron en mí, porque me dieron la fuerza y el coraje para lograr este sueño, que ellos algún día lo vieron muy lejano, ahora me enorgullece decirles: ¡si pude, si se pudo!

A la suerte que me acompaña cada día...

## DEDICATORIA

A mis padres, Fermín Martínez y Zenaida Cirilo, a quienes admiro y respeto por todos sus logros, a ellos por darme la vida, por brindarme su amor, por siempre estar conmigo y apoyarme en todas las decisiones que tomo, por enseñarme que con perseverancia y dedicación es posible alcanzar cualquier meta, cualquier sueño.

A mis hermanos, Daniel, Tania y Fernando, por ser mis mejores amigos y compañeros de alegrías y tristezas, por demostrarme su amor incondicional, porque sin pedirlo siempre están cuando los necesito.

# CONTENIDO

<b>RESUMEN.....</b>	<b>i</b>
<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>ii</b>
<b>DEDICATORIA.....</b>	<b>iii</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>ix</b>
<b>CAPÍTULO 1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....</b>	<b>1</b>
1.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....	1
1.2 ANTECEDENTES .....	3
1.2.1 Disponibilidad de agua en el mundo .....	4
1.2.2 Generación mundial de agua residual, tratamiento y reúso.....	5
1.2.3 Disponibilidad de agua en México.....	9
1.2.4 Situación actual de los acuíferos en México.....	11
1.2.5 Agua residual generada y tratada en México .....	13
1.2.6 Infraestructura existente de tratamiento en México .....	14
<b>CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>16</b>
2.1 ENFOQUE DEL REÚSO INDIRECTO.....	16
2.1.1 Tipos de reúso de agua residual renovada .....	16
2.1.2 Recarga del acuífero como reúso indirecto .....	18
2.1.3 Sistema de recirculación, tratamiento-inyección directa .....	19
2.1.4 Procesos empleados para la recarga de acuíferos .....	21
2.1.5 Recarga gestionada al acuífero con agua renovada .....	23
2.1.6 Clasificación de acuíferos según su comportamiento hidráulico.....	24
2.2 SOSTENIBILIDAD DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN MÉXICO.....	24
2.3 TECNOLOGÍAS EMPLEADAS EN EL TRATAMIENTO AVANZADO DE AGUA RESIDUAL .....	28
2.3.1 Clasificación de las tecnologías de tratamiento.....	29
2.4 JUSTIFICACIÓN .....	30
2.5 BENEFICIOS ESPERADOS.....	30
<b>CAPÍTULO 3. OBJETIVOS .....</b>	<b>33</b>
3.1 Objetivo general.....	33
3.2 Objetivos particulares .....	33
<b>CAPÍTULO 4 METODOLOGÍA.....</b>	<b>34</b>
4.1 ASPECTOS NORMATIVOS A CONSIDERAR EN TODO PROYECTO DE RECARGA DE ACUÍFEROS .....	34

4.1.1 Internacional .....	34
4.1.2 Nacional.....	36
4.2 CASOS DE ESTUDIO DE PROYECTOS DE REÚSO INDIRECTO ANALIZADOS	41
4.2.1 OCWD, Sistema de reabastecimiento de agua subterránea (ampliación de la planta Water Factory 21) .....	41
4.2.2 El Paso, Texas: el primero de EE.UU. ....	43
4.2.3 West Basin Municipal Water District en California.....	45
4.2.4 Windhoek, Namibia: integración de la recarga artificial en la gestión de los recursos hídricos .....	46
4.2.5 Adelaida, Australia: Recarga artificial del acuífero con agua tratada .....	47
4.2.6 Nardó, Italia .....	48
4.2.7 Sadabell, España.....	50
4.2.8 Planta Torreele, Wulpen Bélgica .....	52
4.3 TECNOLOGÍA DEL TRATAMIENTO PARA REÚSO INDIRECTO .....	55
4.3.1 Procesos de barreras múltiples sugeridos por la normatividad nacional para la potabilización de agua residual tratada.....	56
4.3.2 Descripción de las barreras múltiples sugeridas en el proyecto de norma NOM 250 SSA1-2014 .....	60
4.4 ZONAS POTENCIALES PARA INTEGRARSE A UN PLAN DE REÚSO POTABLE INDIRECTO .....	65
<b>CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>66</b>
5.1 ANÁLISIS DE LAS TECNOLOGÍAS .....	66
5.1.1 Tecnología utilizadas para recarga de agua al acuífero .....	66
5.1.2 Eficiencia de remoción de diversos grupos de parámetros y de acuerdo al proceso utilizado en los casos de estudio evaluados .....	69
5.1.3 Diagnóstico de la calidad del agua obtenida con las diversas barreras múltiples que se emplean en los casos evaluados .....	73
5.1.4 Eficiencias de remoción de los CE reportada para diversos procesos de tratamiento de agua residual.....	79
5.1.5 Selección de tecnología relacionada con el tratamiento de agua residual con fines de reúso indirecto sugeridas por el proyecto de NOM 250 (normatividad mexicana) .....	80
5.1.6 Estrategias a considerar para la implementación de un sistema de recarga ....	85
5.1.7 Identificación de zonas con potencial para integrarse a un plan de reúso indirecto .....	86
5.1.8 Propuesta de tren de tratamiento para la posible implementación en México ..	88
<b>CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>91</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>94</b>



Generación de aguas residuales, el tratamiento y el uso a escala mundial .....	94
Calidad de agua regulada por agencias Internacionales y Nacional .....	99
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>108</b>

## INDICE DE IMAGENES

<i>Imagen 1 Población con y sin acceso a una fuente de agua potable.</i>	<i>ix</i>
<i>Imagen 2 Porcentaje de la distribución mundial del agua.</i>	<i>3</i>
<i>Imagen 3 Demanda mundial de agua en 2000 y 2050.</i>	<i>4</i>
<i>Imagen 4 Balance de agua en México anuales (Hm<sup>3</sup>/s).</i>	<i>9</i>
<i>Imagen 5 Descarga de aguas residuales municipales a nivel nacional, 1998–2012.</i>	<i>13</i>
<i>Imagen 6 Plantas de tratamiento de agua residual municipales en operación.</i>	<i>14</i>
<i>Imagen 7 Esquema representativo del Reúso potable indirecto.</i>	<i>17</i>
<i>Imagen 8 Sistema de recirculación, tratamiento-recarga artificial.</i>	<i>20</i>
<i>Imagen 9 Procesos de recarga superficiales.</i>	<i>21</i>
<i>Imagen 10 Procesos de recarga subsuperficiales.</i>	<i>22</i>
<i>Imagen 11 Procesos de recarga subterráneos.</i>	<i>22</i>
<i>Imagen 12 Esquema representativa de pozos de inyección con agua residual renovada.</i>	<i>23</i>
<i>Imagen 13 Diagrama de un acuífero confinado y uno no confinado o libre.</i>	<i>24</i>
<i>Imagen 14 Fases de la planificación e implementación de la GIRH.</i>	<i>25</i>
<i>Imagen 15 Desarrollo sustentable del agua subterránea.</i>	<i>31</i>
<i>Imagen 16 Diagrama de flujo de Orange County Water District, Groundwater replenishment system.</i>	<i>42</i>
<i>Imagen 17 Barreras múltiples que integran la planta West Basin Municipal Water District.</i>	<i>46</i>
<i>Imagen 18 Esquema de recarga del acuífero de Nardó (Sur de Italia).</i>	<i>49</i>
<i>Imagen 19 Esquema de reúso de agua en Sabadell, España.</i>	<i>51</i>
<i>Imagen 20 Esquema de proceso de la planta de regeneración de agua Torreele.</i>	<i>54</i>
<i>Imagen 21 Diagrama de tratamiento mediante barreras múltiples para reúso indirecto.</i>	<i>55</i>
<i>Imagen 22 Membranas utilizadas para la potabilización (microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa).</i>	<i>62</i>
<i>Imagen 23 Intervalos de aplicación de los procesos de membrana.</i>	<i>62</i>
<i>Imagen 24 Esquema de la planta Groundwater replenishment system en California.</i>	<i>66</i>
<i>Imagen 25 Esquema de la planta Fred Hervey en El Paso, Texas.</i>	<i>67</i>
<i>Imagen 26 Esquema de la planta West Basin Municipal Water District en California.</i>	<i>67</i>
<i>Imagen 27 Esquema de la planta GOREANGAB en Windhoek, Namibia.</i>	<i>68</i>
<i>Imagen 28 Esquema de la planta localizada en Sadabell, España.</i>	<i>68</i>
<i>Imagen 29 Esquema de la planta Torreele en Wulpen Bélgica.</i>	<i>68</i>
<i>Imagen 30 Procesos empleados para la remoción de parámetros inorgánicos.</i>	<i>69</i>
<i>Imagen 31 Procesos empleados para la remoción de microorganismos.</i>	<i>70</i>
<i>Imagen 32 Procesos empleados para la remoción de metales y metaloides.</i>	<i>71</i>
<i>Imagen 33 Procesos empleados para la remoción de subproductos de la desinfección.</i>	<i>72</i>
<i>Imagen 34 Procesos de tratamiento empleados para la remoción de parámetros inorgánicos.</i>	<i>81</i>
<i>Imagen 35 Procesos de tratamiento empleados para la remoción de microorganismos.</i>	<i>81</i>
<i>Imagen 36 Procesos de tratamiento empleados para la remoción de productos de la desinfección.</i>	<i>82</i>
<i>Imagen 37 Procesos de tratamiento empleados para la remoción de metales y metaloides.</i>	<i>83</i>
<i>Imagen 38 Esquema del sistema de barreras múltiples de la propuesta 2.</i>	<i>89</i>
<i>Imagen 39 Esquema para la selección del sistema de barreras múltiples.</i>	<i>90</i>

## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1 Disponibilidad natural per cápita (población en millones de habitantes).</i>	10
<i>Tabla 2 Plantas de tratamiento de agua residual municipales en operación.</i>	14
<i>Tabla 3 Tipos de usos del agua residual.</i>	18
<i>Tabla 4 Estrategias ambientales del PNH, 2014-2018.</i>	27
<i>Tabla 5 Componentes químicos típicos que pueden encontrarse en el agua residual y sus efectos.</i>	28
<i>Tabla 6 Eliminación de constituyentes por medio de operaciones y procesos de tratamiento avanzado.</i>	29
<i>Tabla 7 Calidad del agua residual tratada para recarga artificial si no existen captaciones a 1.0 km o menos de distancia al sitio de recarga (NOM-014-CONAGUA-2003).</i>	36
<i>Tabla 8 Número de parámetros evaluados por cada ente regulador.</i>	37
<i>Tabla 9 Parámetros de calidad de agua regulados por agencias a nivel Internacionales y Nacional.</i>	39
<i>Tabla 10 Procesos de tratamiento que remueven los diversos tipos de contaminantes existentes en el agua residual, adaptado del proyecto de la NOM 250 SSA1-2014.</i>	59
<i>Tabla 11 Calidad del agua obtenida en las diversas barreras múltiples de la planta de Orange Country, California.</i>	74
<i>Tabla 12 Porcentajes de remoción de diversos contaminantes emergentes.</i>	79
<i>Tabla 13 Zonas potenciales para implementar un plan de reúso de agua renovada.</i>	87
<i>Tabla 14 Aguas Residuales generadas, Tratadas y utilizadas en América del Norte.</i>	94
<i>Tabla 15 Aguas residuales generadas, tratadas, y utilizadas en América Latina.</i>	94
<i>Tabla 16 Aguas residuales generadas, tratadas, y utilizadas en Europa.</i>	95
<i>Tabla 17 Aguas residuales generadas, tratadas, y utilizadas en Federación de Rusia y los Estados Independientes de la Unión Soviética.</i>	96
<i>Tabla 18 Aguas residuales generadas, tratadas, y utilizadas en Oriente Medio y África del Norte.</i>	97
<i>Tabla 19 Aguas residuales generadas, tratadas, y utilizadas en África Sub-Saharan.</i>	97
<i>Tabla 20 Aguas residuales generadas, tratadas, y utilizadas en Oceanía.</i>	98
<i>Tabla 21 Aguas residuales generadas, tratadas, y utilizadas en Asia.</i>	98
<i>Tabla 22 Parámetros de calidad de agua regulados por agencias a nivel Internacionales y Nacional (COMPLETA).</i>	99

## ÍNDICE DE MAPAS

<i>Mapa 1 Proyección del grado de presión de la disponibilidad de agua en el mundo.</i>	5
<i>Mapa 2 Porcentaje de agua residual tratada con el total del agua residual generada (expresada porcentaje).</i>	6
<i>Mapa 3 Disponibilidad natural per cápita.</i>	10
<i>Mapa 4 Acuíferos continentales en condición de déficit.</i>	11
<i>Mapa 5 Acuíferos continentales en condición de sobreexplotación.</i>	12
<i>Mapa 6 Agua Residual generada (m<sup>3</sup>/s).</i>	13
<i>Mapa 7 Recarga de cuenca en Anaheim.</i>	41
<i>Mapa 8 Proyecto de recarga de El Paso, Texas.</i>	43
<i>Mapa 9 Ubicación del sistema de recarga Bolívar.</i>	47

## INTRODUCCIÓN

El agua, el recurso más importante para la vida en el planeta. Los seres humanos dependemos de su disponibilidad no sólo para el consumo doméstico y el funcionamiento y la continuidad de las actividades agrícolas e industriales. En las últimas décadas, con la finalidad de dotar de agua potable a una población cada vez más numerosa así como de producir más alimentos y energía, la demanda por el líquido crece significativamente.

En la imagen 1 se muestra gráficamente el crecimiento poblacional desde 1990 hasta 2004 y una proyección al 2015. De acuerdo con el registro de la población que cuenta con acceso y sin acceso a una fuente de agua reportada por la Organización Mundial de la Salud, OMS, se desprende que del 2004 al 2015 la población con servicio aumento en un 18% y la población sin servicio disminuyó en un 15%, lo cual indica la existencia de ciertas medidas para incrementar el suministro a ella (WHO/UNICEF, Joint Monitoring Programme for Water Supply and Sanitation, 2006).

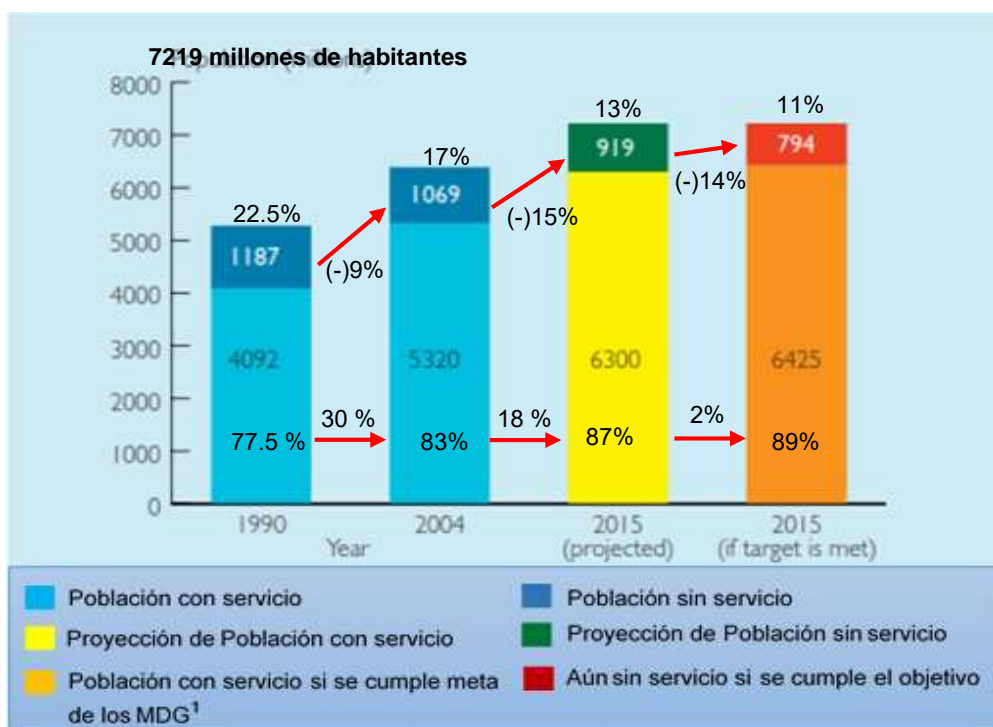


Imagen 1 Población con y sin acceso a una fuente de agua potable.

Fuente: WHO/UNICEF. Joint Monitoring Programme for Water Supply and Sanitation, 2006.

Ante el crecimiento demográfico y socioeconómico del país, así como el cambio climático, las actividades de suministro de agua potable, alcantarillado y tratamiento del agua residual adquieren cada día mayor prioridad. Se evidencia la necesidad de intensificar el reúso del agua residual tratada en los diferentes sectores productivos (Irrigación, manufactura, uso doméstico, etc.), fomentando su intercambio por agua de primer uso cuando esto es posible.

Ante ello, el presente trabajo analiza el potencial de reúso potable indirecto, una de las aplicaciones del reúso de agua renovada que se ha desarrollado, en gran parte, como resultado de las necesidades de agua y de los avances en tecnología del potabilización que permite la producción de agua de alta calidad a costos cada vez más razonables e insumos energéticos reducidos.

Cabe aclarar que en la actualidad, el reúso potable indirecto se está considerando como una opción viable para la sostenibilidad de los recursos hídricos, ya que es una alternativa de suministro de agua que no depende de la precipitación y es posible producir agua renovada de alta calidad con el cumplimiento de normas y lineamientos para reinyección de agua tratada a acuíferos.

La presente tesis se compone de seis capítulos. El capítulo uno, plantea el problema de escases del agua en su enfoque global, donde debido al incremento de la población y a una mala gestión del recurso, la sobreexplotar de las reservas de agua subterránea se hacen evidentes. También, se establece los datos nacionales e internacionales de la disponibilidad del agua dulce y el agua residual que se produce, se presentan los países que tratan agua residual a diferentes niveles. Se menciona a nivel nacional la infraestructura existente para la potabilización del agua y los sistemas empleados.

En el capítulo dos se define el concepto de reúso, la clasificación, y los procesos de recarga del acuífero como parte del reúso indirecto. Por último, se establecen las acciones que pueden realizarse para garantizar la seguridad y la sustentabilidad de los recursos hídricos del país.

Los objetivos generales y particulares del presente trabajo están contenidos en el capítulo tres.

En el capítulo cuatro se hace una análisis de la normatividad a nivel internacional así como la existente en México para los parámetros clave de calidad de agua con fines de recarga al acuífero.

Así mismo se presentan a nivel internacional, ocho casos de estudio de éxito en el tema de reúso indirecto, haciendo énfasis en el tipo de tecnologías empleadas para lograr el nivel de potabilización deseado.

En el capítulo quinto se realiza un diagnóstico y evaluación de las tecnologías de tratamiento exitosas para con ello sugerir dos trenes de tratamiento con posibilidad de aplicación en México.

Finalmente, el capítulo sexto contiene las conclusiones inferidas en el estudio.

# **CAPÍTULO 1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

## **1.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

La población en el mundo se incrementa exponencialmente lo que provoca un aumento en la demanda de agua para cubrir sus necesidades básicas así como para mejorar su calidad de vida. Actualmente, de los 3, 918 km<sup>3</sup> de agua que se extraen en el planeta, el 69% se emplea para riego, el 19% para la industria y el 12% para usos municipales (FAO, 2014). Este volumen de agua se incrementará de 7 219 millones de habitantes actuales, a 9.5 mil millones de habitantes en el año 2050. Todo ello representa un grande reto para los gobiernos, quienes deberán asegurar el abasto a los diferentes usos y usuarios del recurso.

En este sentido, México enfrenta serios problemas de disponibilidad de agua, no sólo por la falta del recurso, sino también por la mala calidad. Como consecuencia, algunas regiones del territorio nacional enfrentan situaciones de estrés hídrico que limitan el desarrollo económico e incluso pueden generar conflictos sociales, por lo que la tendencia en el reúso e intercambio de agua residual tratada por agua de primer uso para cubrir las demandas de la población es inevitable para el futuro.

### **1.1.1 Infraestructura para potabilización y tratamiento en el país**

En 2013 la capacidad de potabilización fue de 94.79 m<sup>3</sup>/s en las 742 plantas que operaban en el país. En cuanto al agua residual, el país cuenta con una infraestructura de tratamiento de 2287 plantas, con una capacidad instalada de operación de 152.2 m<sup>3</sup>/s y el caudal tratado es de tan solo 105.93 m<sup>3</sup>/s es decir 50.2% de los 211.1 m<sup>3</sup>/s generados, la infraestructura de tratamiento debe incrementarse para poder renovar el caudal generado por la población, así como también es importante mencionar que mucha de la infraestructura existente es obsoleta y necesita mantenimiento para poder operar al 100% de su capacidad instalada (CONAGUA, 2014). Con estas cifras, se establece que el agua tratada, puede representar un gran potencial para resarcir parte de la problemática de abastecimiento nacional presente y futura.

### **1.1.2 Fuentes de abastecimiento de agua potable**

El agua subterránea en el país desempeña un papel de gran trascendencia, pues funciona como presas de almacenamiento y red de distribución, siendo posible extraer agua en cualquier época del año de prácticamente cualquier punto de la superficie del acuífero. Dado a la alta demanda de distribución de agua a la población de los 653 acuíferos registrados, 106 acuíferos se encuentran sobreexplotados de los cuales se extrae el 55.2% de agua subterránea para todos los usos.

Debido a la creciente demanda de agua subterránea y a su lenta renovación, en los últimos 40 años la reserva de cerca de 100 acuíferos fue alterada por sobreexplotación y se sigue

mermando al ritmo actual de unos 5,400 millones de metros cúbicos por año ( $Mm^3/año$ ). Un grave impacto ecológico fue generado en las primeras décadas de sobreexplotación (1960-1980), mediante: agotamiento de manantiales, desaparición de lagos y humedales, merma del gasto base de ríos, eliminación de vegetación nativa y pérdida de ecosistemas (NOM-014-CONAGUA-2003). Muchas de las ciudades más importantes son abastecidas por los acuíferos; conforme éstos resultan insuficientes, se ha incrementado gradualmente la importación de agua de áreas o de cuencas adyacentes para complementar su abasto. Sin embargo, esta solución es cada vez menos viable conforme disminuye la disponibilidad de agua y aumentan sustancialmente los costos asociados a su importación, sin contar con los problemas sociales que puede ocasionar su explotación.

En las zonas de acuíferos sobreexplotados, tal situación compromete el desarrollo sostenible de todos los sectores, con serias repercusiones sobre la economía nacional. Por otra parte, a futuro se espera un importante incremento de un 35% a 40% de la demanda de agua (Ver imagen 3), principalmente para usos público-urbano e industrial, y a causa de los cambios climáticos globales, cabe la posibilidad de que ocurran sequías más severas, prolongadas y frecuentes. Lo anterior reclama una administración más racional de la reserva de agua subterránea, que considere las limitaciones impuestas por su lenta renovación y otras restricciones físicas, económicas y ambientales, para propiciar su aprovechamiento flexible y prevenir su sobreexplotación destructiva. Por ello, el enfoque actual en la gestión del agua subterránea tiende a una estrategia integral que incluye, entre otros aspectos como: el manejo de la demanda en todos los sectores (conservación y uso eficiente), el reúso de agua renovada, la participación más activa de los usuarios en la gestión del agua, el diseño de estrategias para la estabilización de acuíferos sobreexplotados y la aplicación de la tecnología de la recarga artificial para preservar e incrementar la reserva de agua subterránea (NOM-014-CONAGUA-2003) éste último de interés para este trabajo.

## 1.2 ANTECEDENTES

El agua es una de los recursos más importantes del planeta. Los seres humanos, las plantas, los animales y todos los organismos deben tener agua para sobrevivir, de ella depende la vida en la tierra.

Se estima que la disponibilidad de agua que existe es de alrededor de 1,400 millones de kilómetros cúbicos de agua en el planeta, de los cuales sólo 2.5% corresponden a agua dulce. Este pequeño porcentaje se localiza principalmente en los ríos, lagos, glaciares, mantos de hielo y acuíferos del mundo (Imagen 2). Casi tres cuartas partes del agua dulce están contenidas en los glaciares y mantos de hielo, de los cuales alrededor de 97% son prácticamente inaccesibles para su uso, ya que se encuentran en Antártica, el Ártico y Groenlandia. Del agua dulce existente en el planeta, 30% corresponde a agua subterránea, 0.8% a Permafrost y sólo el 0.4% a aguas superficiales y en la atmósfera (PNUMA, Perspectivas del Medio Ambiente Mundial, 2007).

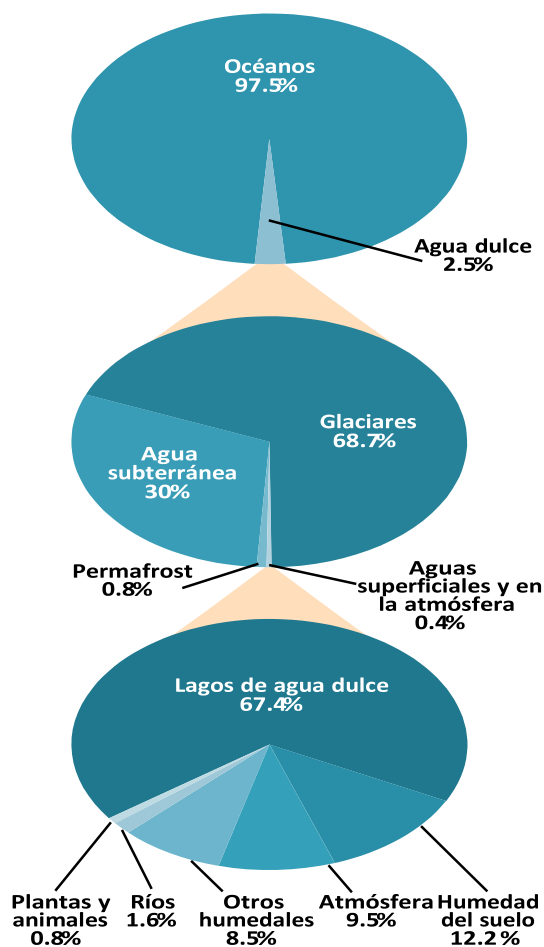
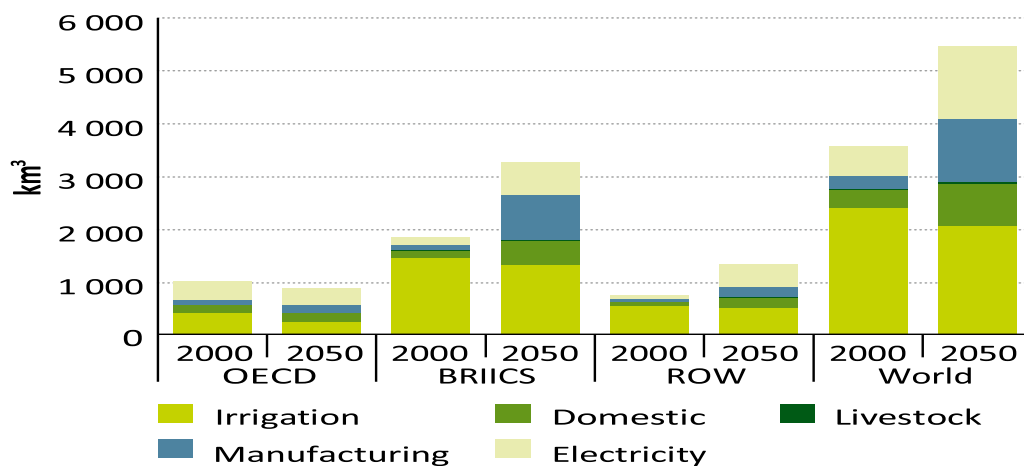


Imagen 2 Porcentaje de la distribución mundial del agua.  
Fuente: Elaboración propia con datos de: PNUMA, 2007.



Si consideramos al agua dulce no congelada (31.2% del volumen de agua dulce total), (PNUMA, 2007). La demanda de agua dulce en el mundo se incrementará significativamente en las próximas décadas, esto atribuido a la creciente urbanización en los países en desarrollo, como se muestra en la Imagen 3, en el año 2050, la demanda global de agua se proyecta para aumentar en un 55%, debido principalmente a la creciente demanda en el sector industrial destacando la manufactura y generación de electricidad así como el uso doméstico (OCDE, 2012). Este incremento presentará grandes retos y presión sobre los recursos en casi todas las regiones, especialmente en los países en desarrollo y las economías emergentes como lo es México (The United Nations World Water Development Report, UNWWDR, 2015).

Dado que la demanda de agua dulce se incrementa con base a la población, y su disponibilidad es de tan solo el 30%, resulta importante conservar las fuentes de abastecimiento para arroyos, manantiales y humedales, así como un recurso fundamental para satisfacer las demandas de agua de muchas sociedades en el mundo. Por esta razón se sabe que, los acuíferos son las reservas de agua más grandes que tenemos y deben establecerse medidas para evitar su agotamiento.



*Note: BRIICS (Brazil, Russia, India, Indonesia, China, South Africa); OECD (Organisation for Economic Cooperation and Development); ROW (rest of the world). This graph only measures 'blue water' demand and does not consider rainfed agriculture.*

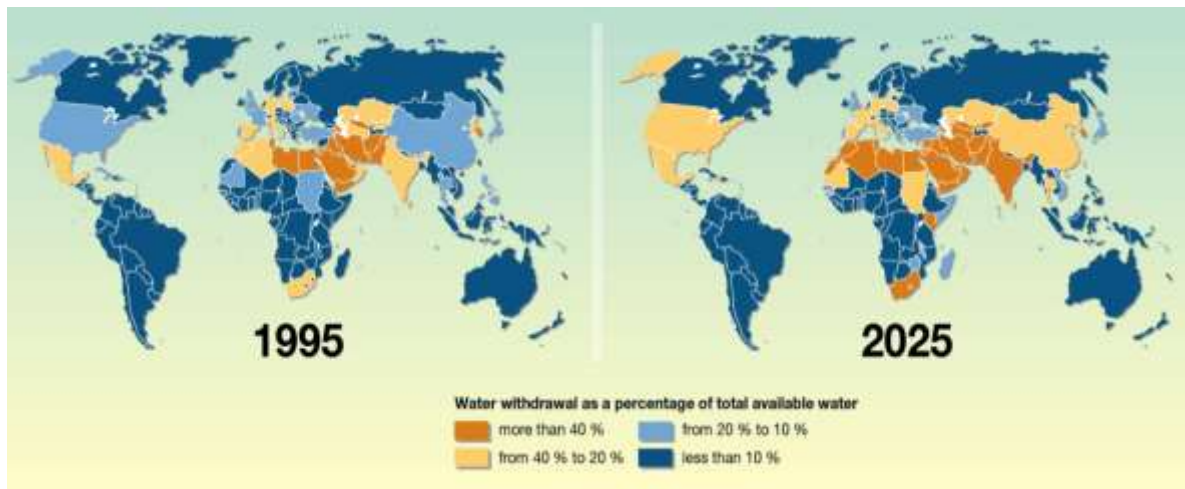
Imagen 3 Demanda mundial de agua en 2000 y 2050.  
Fuente: OECD Environmental, 2006.

### 1.2.1 Disponibilidad de agua en el mundo

Según Population Action International, PAI (2004), con base en las proyecciones medias de población de las Naciones Unidas en 1998, más de 2,8 millones de personas en 48 países se enfrentarán escasez de agua, o a las condiciones de escasez para el año 2025 (Ver Mapa 1). De estos países, 40 se encuentran en el oeste de Asia, África del Norte o sub-África al sur del Sahara. Durante las próximas dos décadas, la población aumenta y la creciente demanda se prevé que empujar todos los países de Asia occidental en

condiciones de escasez de agua. En 2050, el número de países que se enfrentará estrés hídrico o escasez podría aumentar a 54, con una población combinada de cuatro mil millones de personas - alrededor del 40% de la población mundial proyectada de 9,4 mil millones (Gardner-Outlaw y Engleman, 1997; UNFPA, 1997) .

En el caso de México, desde 1995 el estrés hídrico variaba entre 20% y 40% y se espera que para el 2025 el estrés hídrico permanezca dentro de este intervalo (World Meteorological Organization, 1996).



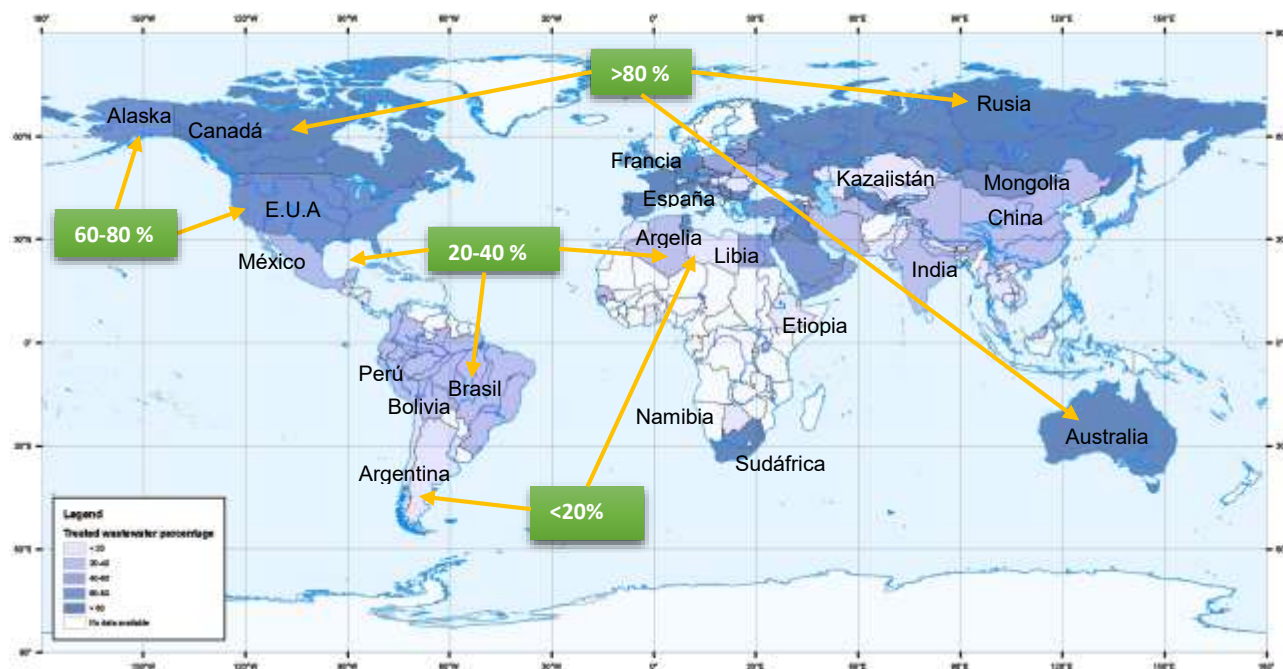
Mapa 1 Proyección del grado de presión de la disponibilidad de agua en el mundo.

Fuente: World Meteorological Organization (WMO), Geneva, 1996; Global Environmental Outlook 2000 (GEO).

## 1.2.2 Generación mundial de agua residual, tratamiento y reúso

El Mapa 2 representa los porcentajes de tratamiento de agua residual, según el país. De acuerdo con el Banco Mundial (World Bank, 2012), el grado de tratamiento, está estrechamente relacionado con el ingreso de cada país., en efecto, en los países de altos ingresos, el tratamiento promedio del agua residual generada es de 70 %, seguido por los países de ingresos media-alta cuyo tratamiento es del 38%, los países de medio-bajos ingresos presentan un tratamiento del 28%, y los países de bajos ingresos, donde es tratada sólo el 8% del agua residual generada.

En el artículo “*Global, regional, and country level need for data on wastewater generation, treatment, and use*”, elaborado por *Agricultural Water Management en 2013, realizado con el objetivo de tener datos nacionales actualizados sobre la generación del agua residual, tratamiento y uso, y con ello tener una mejor gestión del agua residual en los niveles locales y nacionales. En este estudio, se utilizó la clasificación regional de la Food and Agriculture Organization (FAO) modificada de los países en el desarrollo de las estimaciones regionales de uso de agua residual (FAO, 2003). Se consideró en este estudio dos países de América del Norte, 32 en América Latina, 35 en Europa, 15 en la Federación Rusa y los Estados independientes de la antigua Unión Soviética, 20 en Oriente Medio y el Norte de África, 48 en África Subsahariana, 4 en Oceanía, y 25 en Asia (Agricultural Water Management, 2013).*



Mapa 2 Porcentaje de agua residual tratada con el total del agua residual generada (expresada porcentaje).  
Fuente: Agricultural Water Management, 2013.

### **Norteamérica**

El volumen estimado del agua residual generada en América del Norte cada año es de 85 km<sup>3</sup>, de los cuales 61 km<sup>3</sup> son tratados (Ver tabla 14 del anexo). Los grandes volúmenes de agua residual generada y tratada son como ya se dijo a las economías altamente desarrolladas y la utilización de un mayor volumen de agua dulce en los sectores industriales y domésticos. El reporte del uso anual del agua residual tratada es de 2,3 km<sup>3</sup>, que es sólo el 3,8% del agua residual tratada en la región. Por lo tanto, mientras que alrededor del 75% del agua residual generada en América del Norte es tratada, se utiliza sólo una pequeña fracción.

### **América Latina**

En América Latina, el volumen estimado del agua residual generada cada año es de 30 km<sup>3</sup>, de los cuales sólo el 5.47 km<sup>3</sup> se tratan, esto representa sólo el 20% del agua residual generada y para los cuales no se dispone de datos pertinentes, en parte debido a que muchos países de América Latina no tienen sistemas de recolección y tratamiento de agua residual, desarrollados (ONU, 2012). (Ver Tabla 15 del Anexo).

## ***Europa***

El volumen estimado de agua residual generada en Europa cada año es de 52.44 km<sup>3</sup>, de los cuales 33.039 km<sup>3</sup> son tratados (Ver Tabla 16 del Anexo). La mayor parte del agua residual generada en Europa (71%) se somete a tratamiento, debido en parte a la alta conciencia pública en materia de protección de la salud y el medio ambiente, el avance tecnológico de los métodos de tratamiento de agua residual, y las inversiones por la mayoría de los gobiernos en los sistemas de tratamiento de agua residual (OCDE, 2008 y de la ONU, 2012).

## ***Federación de Rusia y los Estados Independientes de la Unión Soviética***

El volumen estimado de agua residual generada en Federación de Rusia y los Estados Independientes de la Unión Soviética cada año es de 27.48 km<sup>3</sup>, de los cuales 20.15 km<sup>3</sup> son tratados. El volumen de agua residual tratada en la Federación de Rusia está a unos 14 km<sup>3</sup>/año (DAES-DDS, 2004). Casi el 28% de este se trata de acuerdo con el reglamento establecido, mientras que el resto se emite en forma de tratados inadecuadamente en cuerpos de agua. Los principales factores para la baja eficiencia de las plantas de tratamiento de agua residual son la gestión insuficiente (60% de las plantas de tratamiento se sobrecarga) e instalaciones obsoletas (40% ha estado en funcionamiento durante unos 30 años y la necesidad de rehabilitación) (Ver Tabla 17 del Anexo).

## ***Oriente Medio y África del Norte***

El volumen estimado de agua residual generada en la región de Oriente Medio y Norte de África (MENA) es 22,3 km<sup>3</sup>/ año, de los cuales el 51% se trata (Ver Tabla 18 del Anexo). Con la excepción de Argelia e Irak, la información completa sobre la generación de agua residual, tratamiento y uso está disponible en todos los países de la región.

## ***África Sub-Saharan***

El volumen estimado de agua residual generada en África Sub-Saharan cada año es de 3.707 km<sup>3</sup>, de los cuales 3.29 km<sup>3</sup> son tratados. La mayor parte de agua residual no se trata en África subsahariana, donde la contaminación del agua provoca la propagación de enfermedades transmitidas por el agua, como la diarrea y el cólera (OMS, 2007 y OMS, 2008). En la mayoría de los casos, el agua residual usada en la agricultura está contaminada. (Ver Tabla 19 del Anexo)

## ***Oceanía***

El volumen estimado de agua residual generada en Oceanía cada año es de 2.094 km<sup>3</sup>, de los cuales 2.327 km<sup>3</sup> son tratados (Ver Tabla 20 del Anexo). Alrededor del 45% de los 450 proyectos de uso de agua residual en Oceanía se encuentran en la agricultura (Bixio et al., 2005). En Australia, se estima que 0,35 km<sup>3</sup> de agua residual tratadas se utilizan anualmente. Este volumen representa el 19% del agua residual tratada en el país y alrededor del 4% del suministro total de agua (ABS, 2010).

## **Asia**

El volumen estimado de agua residual generada en Asia cada año es de 133.12 km<sup>3</sup>, de los cuales 42.17 km<sup>3</sup> son tratados (Ver Tabla 21 del Anexo). Sólo alrededor del 32% de agua residual generada en Asia se trata, en gran parte debido a la falta de instalaciones de tratamiento en varios condados (WEPA-IGES, 2012). La limitación más común en Asia es la falta de recursos financieros, seguida de la falta de políticas bien definidas y la falta de personal calificado en el ámbito de la gestión del agua residual (ONU, 2000).

Al examinar los datos de 181 países, se establece que en 55 países (30,4%) se dispone de datos sobre los tres aspectos de producción de agua residual, tratamiento, y reúso. En algunos casos, incluso los conjuntos de datos de estos 55 países no son recientes, y por lo tanto no pueden proporcionar estimaciones correctas de la situación actual. En muchas regiones, los volúmenes de agua residual han ido en aumento con poblaciones en rápido crecimiento, la urbanización, la mejora de las condiciones de vida y el desarrollo económico.

Se encontró que 113 países tienen datos disponibles sobre la producción de agua residual, 103 países en el tratamiento de agua residual, y sólo 62 países sobre el reúso. Por lo tanto los datos sobre el uso de agua residual son limitados y sólo representa el 34% de los países para los que se llevó a cabo el estudio (Agricultural Water Management, 2013).

En el caso de México, la CONAGUA presenta datos sobre la disponibilidad, agua residual generada y tratada e infraestructura de tratamiento y potabilización, los cuales se presentan a continuación.

### 1.2.3 Disponibilidad de agua en México

El volumen promedio de agua que ingresa al país en forma de precipitación es de 1488.8 km<sup>3</sup> anuales, del cual 71.5% regresa a la atmósfera por evapotranspiración (Imagen 4), el 22.1% escurre por los ríos y arroyos y el restante se infiltra al subsuelo de forma natural y recarga los acuíferos.

Para tener el balance completo es necesario agregar alrededor de 48.4 km<sup>3</sup> anuales que ingresan por importaciones de los ríos de las fronteras norte y sur y restar las exportaciones a los Estados Unidos que contabilizan 0.432 km<sup>3</sup> anuales. Así, en el balance general la disponibilidad natural media en México es de 471.5 km<sup>3</sup> anuales de agua en promedio al año (CONAGUA, 2014).

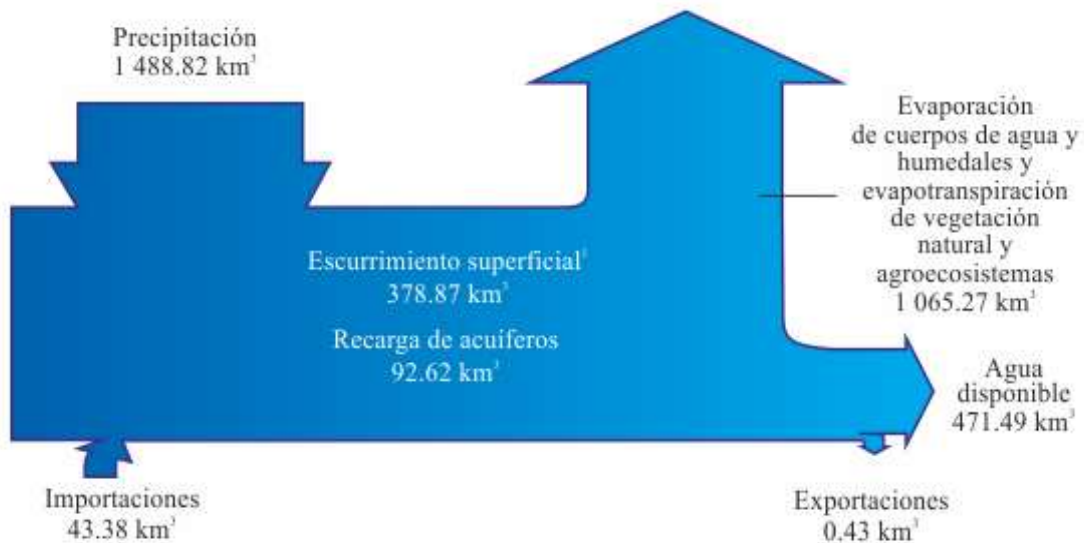
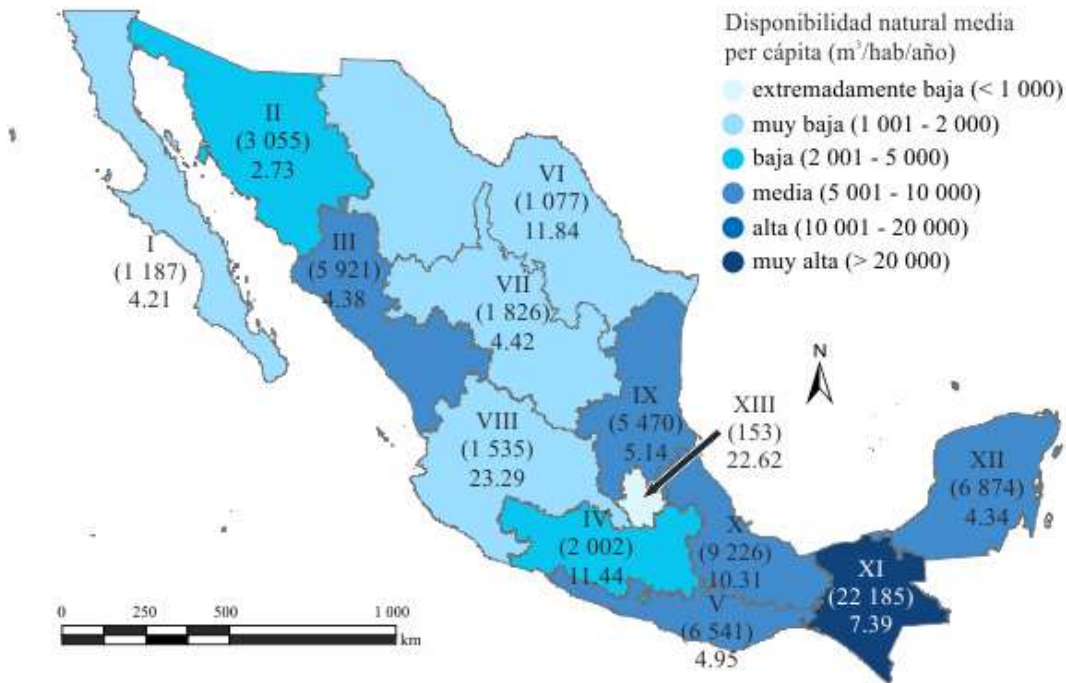


Imagen 4 Balance de agua en México anuales (Hm<sup>3</sup>/s).

Fuente: CONAGUA, SEMARNAT, 2013

#### 1.2.3.1 Disponibilidad natural media per cápita por región hidrológica

El país actualmente enfrenta problemas de disponibilidad de agua en diferentes grados (Mapa 3), no sólo por la falta del recurso, sino también por la mala calidad de los cuerpos de agua. En la Tabla 1, se presenta la disponibilidad per cápita en Hm<sup>3</sup> por región hidrológica en el país. Dado este problema se presenta escasez en algunas regiones del país (CONAGUA, 2015).



Mapa 3 Disponibilidad natural per cápita.  
Fuente: CONAGUA. SEMARNAT. 2013

REGIÓN HIDROLÓGICO ADMINISTRATIVA	DISPONIBILIDAD NATURAL MEDIA TOTAL [Hm³]	POBLACIÓN	DISPONIBILIDAD NATURAL MEDIA PER CÁPITA [m³/hab/año]
I Península de Baja California	4 999	4.2	1 187
II Noroeste	8 325	2.7	3 055
III Pacífico Norte	25 939	4.4	5 921
IV Balsas	22 899	11.4	2 002
V Pacífico Sur	32 351	5.0	6 541
VI Río Bravo	12 757	11.8	1 077
VII Cuencas Centrales del Norte	8 065	4.4	1 826
VIII Lerma-Santiago-Pacífico	35 754	23.3	1 535
IX Golfo Norte	28 115	5.1	5 470
X Golfo Centro	95 124	10.3	9 226
XI Frontera Sur	163 845	7.4	22 185
XII Península de Yucatán	29 856	4.3	6 874
XIII Aguas del Valle de México	3 468	22.6	153
Total	471 498	117.1	4 028

Tabla 1 Disponibilidad natural per cápita (población en millones de habitantes).  
Fuente: CONAGUA, SEMARNAT, 2013



## 1.2.4 Situación actual de los acuíferos en México

La importancia del agua subterránea se manifiesta en la magnitud del volumen utilizado por los principales usuarios. Alrededor del 37% del volumen total es concesionado para usos consuntivos (30,374 millones de metros cúbicos por año). En el 2013 se tenían publicadas las disponibilidades de 653 acuíferos en la República.

### 1.2.4.1 Acuíferos en condición de déficit en el país

En 2013 existían 195 acuíferos cuya disponibilidad es negativa y se expresa como déficit (Ver mapa 4).



Mapa 4 Acuíferos continentales en condición de déficit.  
Fuente: CONAGUA, SEMARNAT (2013).

### 1.2.4.2 Sobreexplotación de acuíferos

Se define si los acuíferos se consideran sobreexplotados o no, en función de la relación extracción/recarga. Del 2001 a la fecha el número de acuíferos sobreexplotados ha oscilado entre 100 y 106. Al 31 de diciembre de 2013 existían 106 acuíferos en esta condición (Ver mapa 5). De estos acuíferos se extrae aproximadamente el 55.2% del agua subterránea para todos los usos.





Mapa 5 Acuíferos continentales en condición de sobreexplotación.  
 Fuente: CONAGUA, SEMARNAT, 2013.

### 1.2.4.3 Acuíferos con intrusión marina y/o bajo el fenómeno de salinización de suelos y aguas subterráneas salobres

Para el 2013 se habían identificado 31 acuíferos con presencia de suelos salinos y agua salobre, localizados principalmente en la Península de Baja California y en el altiplano mexicano. En estas regiones convergen condiciones de poca precipitación pluvial, altos índices de radiación solar y por tanto de evaporación, así como la presencia de aguas congénitas y de minerales evaporíticos de fácil disolución. En tanto que se presentaba intrusión marina en 15 acuíferos costeros a nivel nacional (CONAGUA, 2013).

## 1.2.5 Agua residual generada y tratada en México

La descarga de agua residual de origen urbano proviene de viviendas, edificios públicos y de la escorrentía urbana que se colecta en el drenaje. En México en 2012, los centros urbanos descargaron aproximadamente 7.3 km<sup>3</sup> (equivalente a 229.73 m<sup>3</sup>/s) de agua residual (Imagen 5). Sus principales contaminantes son el nitrógeno y fósforo, compuestos orgánicos, bacterias coliformes fecales, materia orgánica, entre otros.

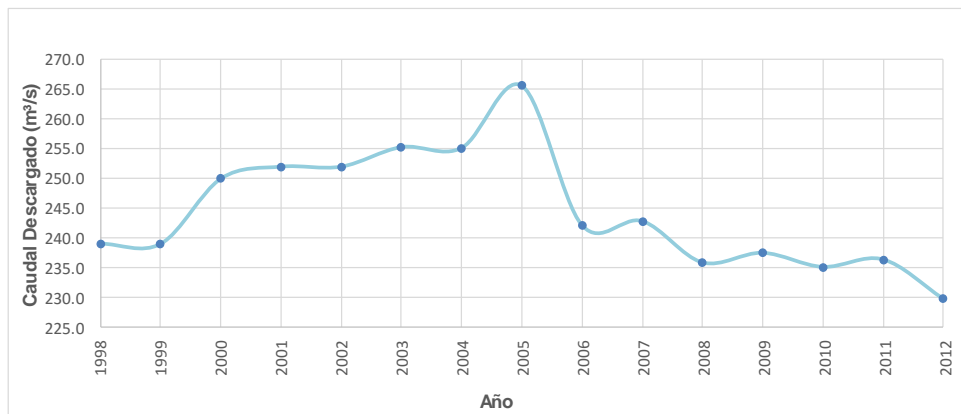
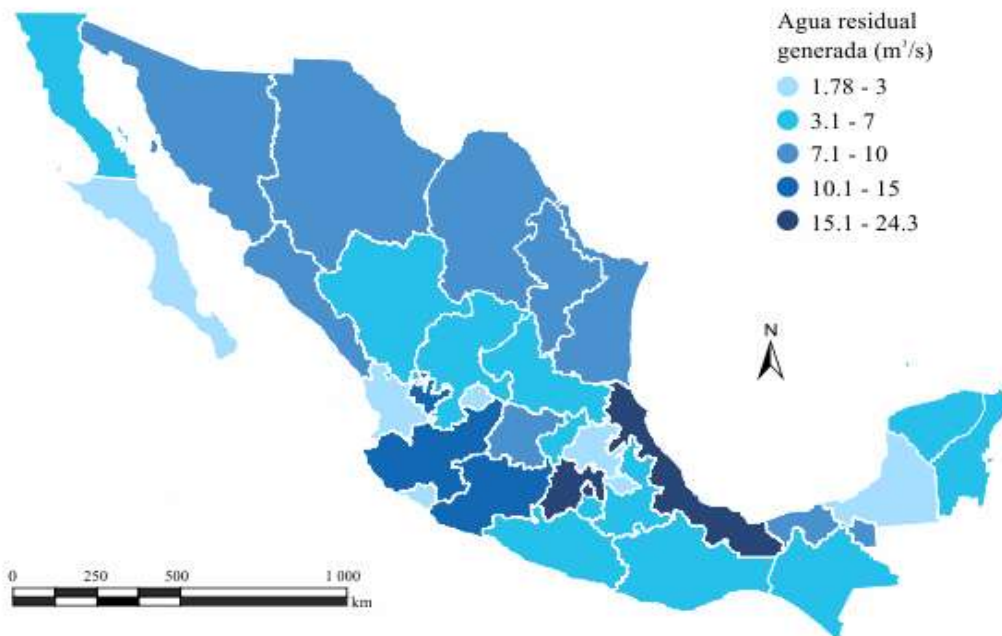


Imagen 5 Descarga de aguas residuales municipales a nivel nacional. 1998–2012.  
Fuentes: CONAGUA, SEMARNAT (2011-2013).

### 1.2.5.1 Agua residual municipal generada por entidad federativa

La mayor cantidad de agua residual generada (Mapa 6) se concentra principalmente donde la población es mayor, tal es el caso de los estados como Veracruz, Estado de México y D.F., donde su población es de 7%, 14% y 8% respectivamente.



Mapa 6 Agua Residual generada (m<sup>3</sup>/s).  
Fuente: CONAGUA, SEMARNAT (2013).

## 1.2.6 Infraestructura existente de tratamiento en México

En el año 2013, las 2287 plantas en operación en el país trataron 105.9 m³/s, es decir 50.2% de los 211.1 m³/s recolectados en los sistemas de alcantarillado. En la tabla 2 se indican las plantas de tratamiento en operación por región hidrológica administrativa (RHA).

Clave	RHA	Número de plantas en operación	Capacidad instalada (m³/s)	Caudal tratado (m³/s)
I	Península de Baja California	63	9.25	6.52
II	Noroeste	102	5.54	3.75
III	Pacífico Norte	339	9.92	7.72
IV	Balsas	190	9.89	7.76
V	Pacífico Sur	88	4.65	3.74
VI	Río Bravo	227	33.86	23.02
VII	Cuencas Centrales del Norte	146	6.71	5.43
VIII	Lerma-Santiago-Pacífico	576	39.8	26.52
IX	Golgo Norte	94	5.63	4.27
X	Golgo Centro	147	7.2	5.59
XI	Frontera Sur	114	4.42	2.58
XII	Península de Yucatán	83	3.06	1.98
XIII	Aguas de Valle de México	118	12.27	7.05
	<b>Total</b>	<b>2287</b>	<b>152.2</b>	<b>105.93</b>

Tabla 2 Plantas de tratamiento de agua residual municipales en operación.

Fuente: CONAGUA, SEMARNAT (2013).

Los procesos de tratamiento de las plantas de agua residual en operación en el país mayormente utilizados son: lagunas de estabilización y lodos activados (ver imagen 6)

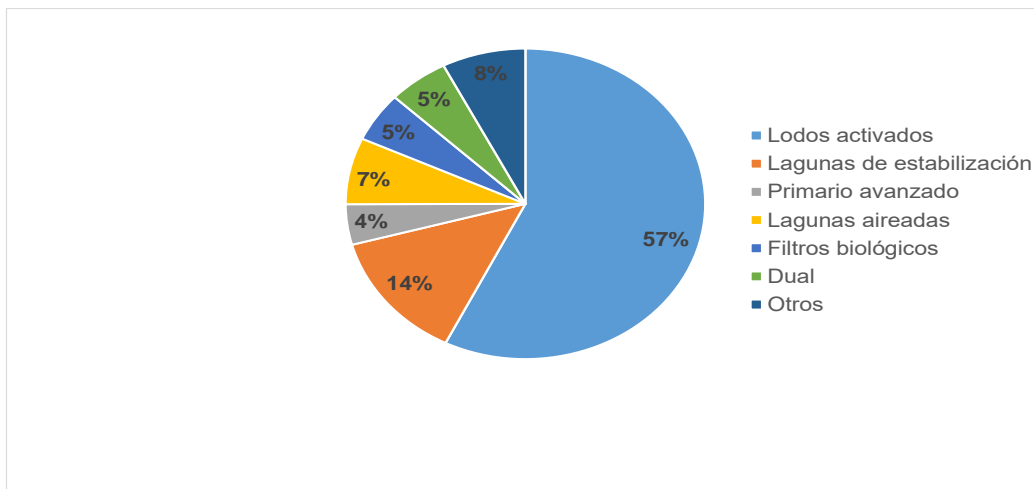


Imagen 6 Plantas de tratamiento de agua residual municipales en operación.

Fuente: CONAGUA, SEMARNAT, 2013.

En este capítulo, se realizó un análisis de la problemática existente en el país y en todo el mundo, donde debido al crecimiento exponencial de la población las fuentes de agua subterránea han sido sobreexplotadas. Sumado a ello el agua residual generada no se colecta al cien por ciento, lo cual provoca que las plantas de tratamiento no trabajen al cien por ciento de su capacidad, por otro lado la infraestructura de tratamiento existente en México es obsoleta, y el máximo nivel de tratamiento que recibe es mediante lodos activados. Además el efluente generado por estas plantas no cumple con los estándares de calidad que establece la NOM-014-CONAGUA-2003 (Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada). Por lo tanto se tienen que establecer estrategias para dar solución a este grupo de problemas mencionados.

## CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

### 2.1 ENFOQUE DEL REÚSO INDIRECTO

Como se mencionó en el capítulo anterior, la presión sobre el suministro de agua local crece directamente proporcional con el crecimiento de las zonas urbanas, especialmente por las necesidades de agua subterránea, debido a que en algunas de las fuentes no poseen la calidad del agua necesaria para utilizarse sin realizar previamente un procesos de potabilización que aseguren una calidad aceptable, además de la disminución del nivel freático de las fuentes de suministro por falta de una gestión integral.

Entre las opciones viables para el abastecimiento y almacenamiento de éste recurso, se encuentran los métodos directos (potabilización de fuentes superficiales y extracción de agua de pozos), los métodos de reúso indirecto (la recarga de acuíferos con agua residual tratada también conocida como agua renovada) y el aprovechamiento de agua de lluvia; los cuales se complementan con el reúso del agua residual tratada (reúso potable directo, DPR, por sus siglas en inglés) como opciones de mitigación al problema del desabasto en los suministros de agua municipales (Chávez et al., 2015).

#### 2.1.1 Tipos de reúso de agua residual renovada

Cuando se habla del reúso de agua residual municipal tratada a nivel potable, es útil distinguir entre reúso “indirecto” y “directo”, así como el concepto de reúso potable “planificado” y “no planificado”. A continuación se definen estos conceptos de acuerdo con *National Research Council*, 1994:

- ❖ La *reutilización potable directa* es la adición inmediata de agua residual regenerada al sistema de distribución de agua.
- ❖ La *reutilización potable indirecta* de agua potable es la extracción, tratamiento y distribución de agua para consumo humano de una fuente natural que se alimenta, en parte, por la descarga de efluentes de agua residual.
- ❖ El *reúso potable indirecto no planificado* es la adición intencionada o no de agua residual (tratadas o no) al suelo o un suministro de agua que se utiliza posteriormente (por lo general por las comunidades aguas abajo) como fuente de agua, con un tratamiento adicional antes de la entrega.
- ❖ El propósito del *reúso potable indirecto planeado* o intencional de agua es el aumento de agua en una fuente de suministro de agua con agua renovada procedente de agua residual tratada. El agua recibe un tratamiento adicional antes de su distribución. Un ejemplo de este tipo de reúso es para la recarga de acuíferos planeado con amplios efluentes terciarios tratados de las plantas de renovación de agua (*National Research Council*, 1994).

La información y análisis de este estudio se enfoca a identificar los criterios y zonas potencialmente factibles en el país para el *reúso potable indirecto planificado* de agua

residual municipal tratada (a la que denominaremos reúso de agua renovada), para la recuperación de zonas donde los acuíferos se encuentran en déficit o en sobreexplotación.

De acuerdo con *Recycled water en Australia, 2015*, **el reúso potable indirecto** se define como el retorno del agua tratada, también aguas arriba de la de tratamiento de agua. El retorno podría ser en un importante depósito de suministro de agua, una corriente de alimentación de un depósito, o en un manto acuífero de suministro. El agua retornada es probable que se diluya significativamente con otro tipo de agua “natural” y que habría una real o percibida separación espacial o temporal entre el punto de retorno del agua tratada y la del punto de uso tal y como se establece en la imagen 7.

El proceso inicia con la recolección de agua residual producida por una población, este efluente es enviado a una planta de tratamiento de agua residual, PTAR. Posterior a su tratamiento, el producto final es enviado a un embalse, río, etc. esto depende principalmente del uso o fin que se tenga para el producto final. Si el efluente es enviado a un río como se observa en la imagen 7, el efluente aguas abajo del río se envía a una planta potabilizadora, y puede enviarse a la población o bombear a pozos de inyección de recarga de agua subterránea.

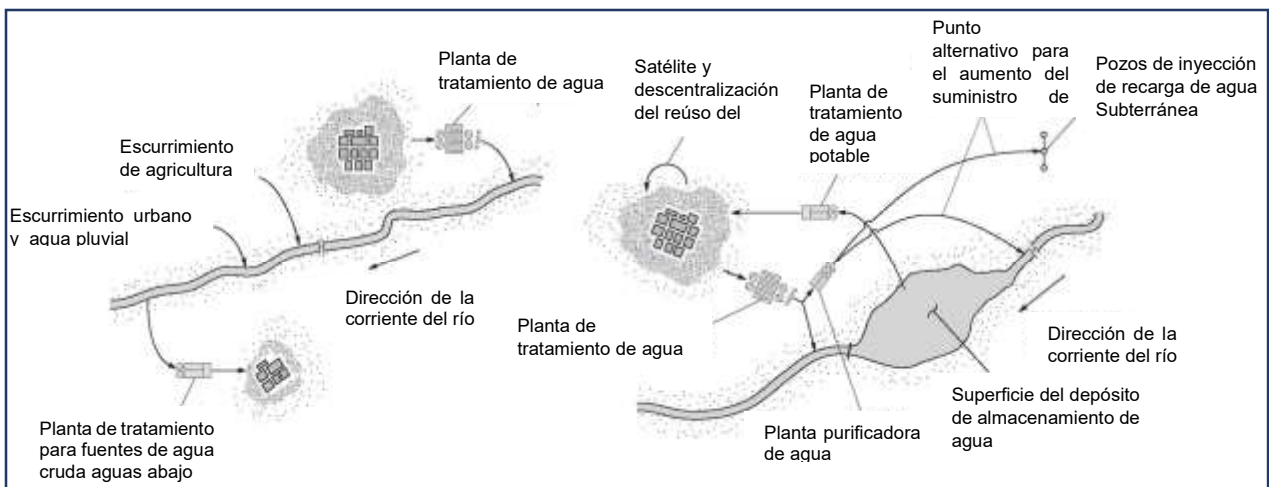


Imagen 7 Esquema representativo del Reúso potable indirecto.

Fuente: (Tchobanodlous. 2012).

Como alternativa a la liberación de efluentes de agua residual en el medio ambiente, el agua residual recuperada se puede reutilizar para una variedad de propósitos (Tabla 3). En la actualidad, la mayor parte del agua reciclada se utiliza para aplicaciones no potables, por ejemplo:

- ❖ Riego en áreas verdes
- ❖ Riego en la agricultura
- ❖ Usos urbanos no potables
- ❖ Uso industrial
- ❖ Descarga a embalses
- ❖ De aumento de la corriente, pantanos, humedales

- ❖ **Recarga de acuíferos**
- ❖ Aumento en el suministro de agua potable
- ❖ Otros

Tabla 3 Tipos de usos del agua residual.

Categoría de uso	Tipos específicos de uso
El riego de jardines	Parques, patios, cementerios, campos de golf, zonas escolares, zonas verdes, residenciales y otros céspedes
Riego en la agricultura	Los cultivos de alimentos, las plantas forrajeras, fibra, cultivos de semillas, viveros, granjas de césped, silvicultura.
Usos urbanos no potables	Sanitarios, protección contra incendios, lavanderías comerciales, lavado de vehículos, limpieza de calles, fuentes decorativas y otras características del agua.
Uso industrial	Refrigeración, alimentación de calderas, pila de lavado, agua de proceso
Descarga a embalses	Recreativo (incluyendo el contacto de cuerpo completo).
Usos ambientales	De aumento de la corriente, pantanos, humedales, etc.
<b>Recarga de acuíferos</b>	El almacenamiento y recuperación de acuíferos, control de intrusión de agua de mar, el control de hundimiento del suelo.
Aumento en el suministro de agua potable	Suministro de agua potable.

La recarga de acuíferos con agua residual tratada es el tipo de reúso al que se debe de dar mayor atención, ya que la demanda de agua subterránea incrementa exponencialmente produciendo problemas de escases y sobreexplotación de los mismos.

### 2.1.2 Recarga del acuífero como reúso indirecto

La recarga artificial es una tecnología que se aplica con diferentes objetivos; los más comunes son: atenuar efectos de sobreexplotación tales como: el abatimiento de los niveles del agua, el asentamientos del terreno o intrusión salina; dar tratamiento natural al agua en el subsuelo; manejar los acuíferos como vasos de almacenamiento y regulación, y utilizar el subsuelo como una red natural de acueductos. Desde el punto de vista técnico, la factibilidad de la recarga artificial depende, entre otros factores, de que exista agua disponible para tal fin y de que ésta sea de calidad tal que no deteriore la calidad del agua subterránea nativa o que sea factible su tratamiento para prevenir riesgo de contaminación.

Las fuentes de recarga a considerar son: El agua de lluvia colectada en instalaciones urbanas, los escurrimientos extraordinarios generados por lluvias torrenciales, el agua superficial regulada en presas de almacenamiento y el agua residual de las zonas urbanas-industriales. Estas últimas constituyen un cuantioso recurso potencial para recarga, por su

permanencia y magnitud creciente, aunque en gran parte ya es utilizado con fines agrícolas, en la mayoría de los casos sin tratamiento alguno. En el caso de México, el volumen de agua residual no municipal generado en el país asciende a 171 m<sup>3</sup>/s de éstas, son tratadas 26 m<sup>3</sup>/s y de estas 6.3 m<sup>3</sup>/s tienen un reúso directo por lo que 156.3 m<sup>3</sup>/s tienen un reúso indirecto y 9.1 descargan a cuerpos receptores. El agua residual municipal ascienden a 50 m<sup>3</sup>/s mediante un total de 1,132 plantas (Estadísticas del Agua en México, 2003, CONAGUA). A la fecha existen cinco distritos de riego, Hidalgo (3), Chihuahua (1), Puebla (1), y Estado de México (1), que aprovechan el agua residual para irrigar campos de cultivo. Estudio reciente realizado por el Instituto de Ingeniería (Chávez et al., 2015) identificaron alrededor de 11 distritos de riego, distribuidos en 10 estados de la República (Guanajuato, Baja California, Morelos, Coahuila, Michoacán, Tamaulipas, Sonora, Sinaloa y Veracruz), con capacidad de reutilizar aguas residuales para fines agrícolas.

### **2.1.2.1 Ventajas obtenidas con la recarga de acuíferos**

Dentro de las ventajas que se tienen al realizar la recarga del acuífero se puede pensar en lo siguiente:

- ❖ *Restablecimiento de un acuífero sobreexplotado.*- La sobreexplotación de acuífero se produce cuando la extracción del agua del subsuelo se realiza a un ritmo superior al de la infiltración o recarga natural. Al inyectar agua al subsuelo es posible restablecer y evitar que se agoten los acuíferos, también ayuda a controlar o prevenir hundimientos del terreno.
- ❖ *Evita la intrusión salina.*- La intrusión salina en zonas costeras se debe a la sobreexplotación de acuíferos, la invasión de agua salada se caracteriza por el movimiento del agua de mar hacia los acuíferos libres o confinados, originando el desplazamiento del agua dulce de estos acuíferos y homogeneiza el agua salada con el agua dulce. Para evitar esta mezcla de agua se recomienda la inyección, y así poder mantener los niveles adecuados en el acuífero.
- ❖ *Almacenamiento.*-Un acuífero sirve como un tanque de almacenamiento y se usa durante la época de secas.

### **2.1.3 Sistema de recirculación, tratamiento-inyección directa**

La recarga de los acuíferos se logra por percolación desde la superficie o por inyección directa. En el primer caso, el agua se infiltra desde lagunas de difusión, a través de la zona no saturada hasta el acuífero. En cambio, la inyección directa exige bombear del agua tratada al acuífero (imagen 8). La inyección directa principalmente se emplea donde el acuífero se ubica a gran profundidad o donde la topografía o los usos del suelo hacen impráctica o muy costosa la recarga por difusión.



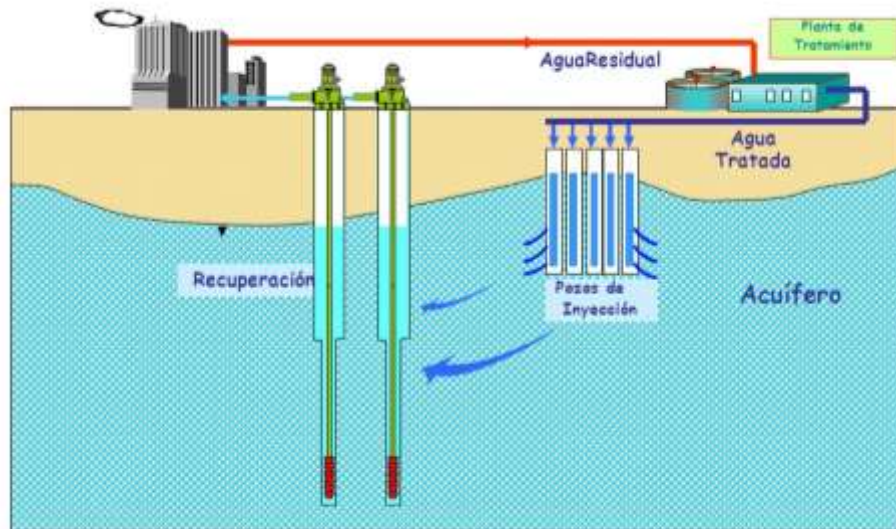


Imagen 8 Sistema de recirculación. tratamiento-recarga artificial.  
Fuente: CONAGUA, 2007.

La recarga artificial del acuífero es la herramienta utilizada para lograr un equilibrio entre las recargas y descargas que sufre el mismo para satisfacer las necesidades de la población. La Gestión de la Recarga de los Acuíferos (GRA, o *Management of Aquifer Recharge, MAR* por sus siglas en inglés) se entiende como el proceso mediante el cual se inyecta agua en un estrato permeable del suelo, que puede o no contener agua inicialmente, con el fin de ser almacenada y ligeramente tratada, con la posibilidad de ser extraída y utilizada posteriormente.

El tipo de recarga artificial del acuífero se divide en tres clases:

- *No intencional o accidental*: como sucede en el riego incidental de cultivos, la deforestación y las fugas en tuberías de abastecimiento y drenaje.
- *No gestionada*: como pozos y tanques sépticos, dispuestos para recibir el agua por lo general contaminada y sin fines de reúso.
- **Gestionada**: es la que se realiza de manera intencional a través de mecanismos como pozos o lagunas, con el objetivo de reutilizar el recurso y/o reducir el impacto ambiental.

Para poder realizar algún tipo de recarga es necesario tomar en cuenta el tipo de agua de recarga:

- *Agua superficial*. Es aquella que proviene de ríos, arroyos, canales (permanentes o intermitentes), lagos, lagunas y embalses artificiales.
- *Agua potable*. Es agua de alta calidad utilizada para recargar el acuífero confinado, o aquellos que sean de gran profundidad, con el fin de ser un almacenamiento subterráneo del recurso.
- *Agua pluvial*. El agua que proviene de la precipitación.

- **Agua renovada.** Agua residual que se reutiliza una vez que se ha sometido a alguna clase de tratamiento o potabilización y que será de importancia para el desarrollo de esta tesis.

## 2.1.4 Procesos empleados para la recarga de acuíferos

Para llevar a cabo la recarga de los acuíferos existen diversos procesos, los cuales pueden agruparse en tres grandes categorías:

### 1) Procesos superficiales

Los procesos superficiales ofrecen ventajas de operación e ingeniería debido a que tienen un bajo costo, son más sencillos de operar y diseñar, y en ellos se puede recargar agua de calidad media; sin embargo, requieren de grandes extensiones de tierra, así como de suelos permeables, por tanto, no son factibles en zonas donde el terreno necesario es caro o inexistente; además, éstos sistemas sólo pueden ser usados para recargar acuíferos no confinados o libres, pues el agua ingresa al subsuelo por gravedad (Ver Imagen 9).

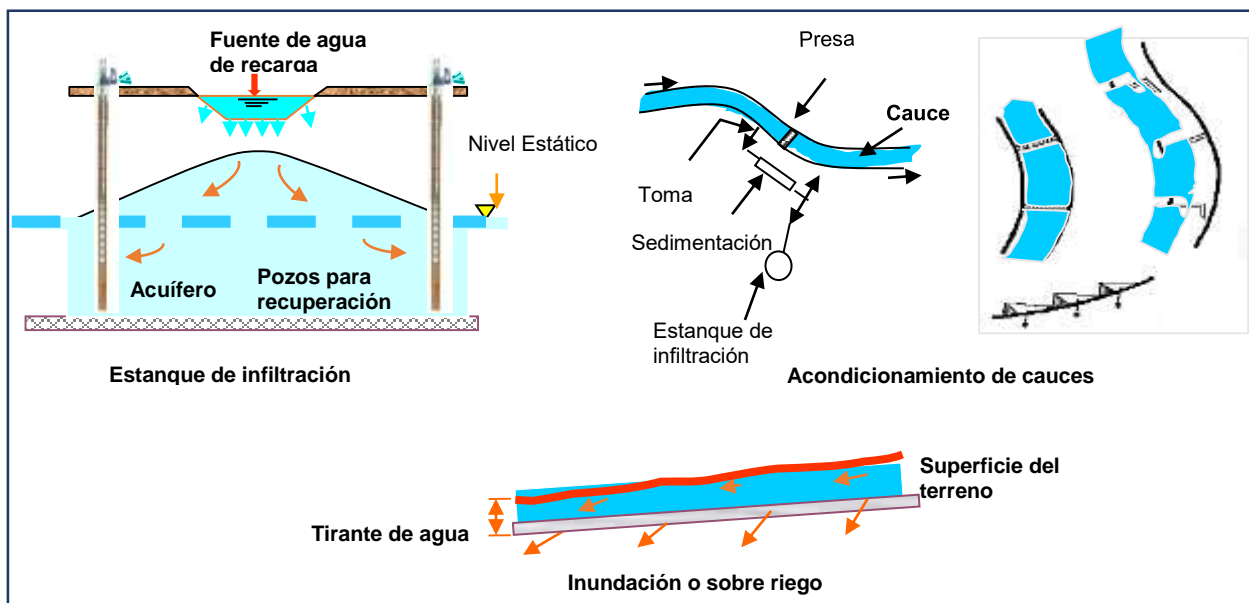


Imagen 9 Procesos de recarga superficiales.

Fuente: CONAGUA, Subdirección General Técnica Gerencia de Aguas Subterráneas, 2007.

## 2) Procesos subsuperficiales

La recarga a través de pozos de infiltración subsuperficial se utiliza para recargar acuíferos libres en el caso de que no existan las condiciones para desarrollar un sistema superficial de recarga (Ver imagen 10).

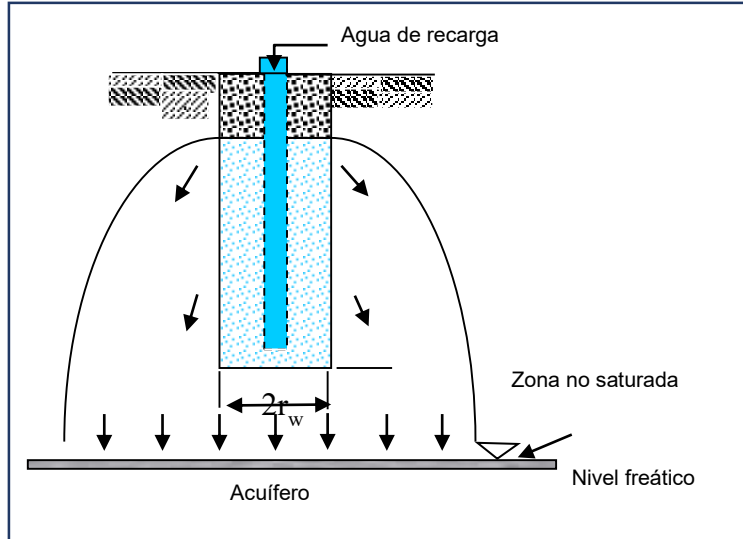


Imagen 10 Procesos de recarga subsuperficiales.  
Fuente: CONAGUA, Subdirección General Técnica Gerencia de Aguas Subterráneas, 2007.

## 3) Subterráneos

Para llevar a cabo la recarga de acuíferos confinados se utilizan pozos subterráneos que penetran el estrato impermeable del subsuelo y llegan hasta el acuífero (Ver Imagen 11). Para poder realizar recargas en éste tipo de sistemas, se requiere agua de una calidad superior (potable) para evitar problemas de obstrucción y contaminación del acuífero, pues el tratamiento que ofrece el sistema suelo-acuífero en este caso es prácticamente nulo (DINA-MAR, 2010).

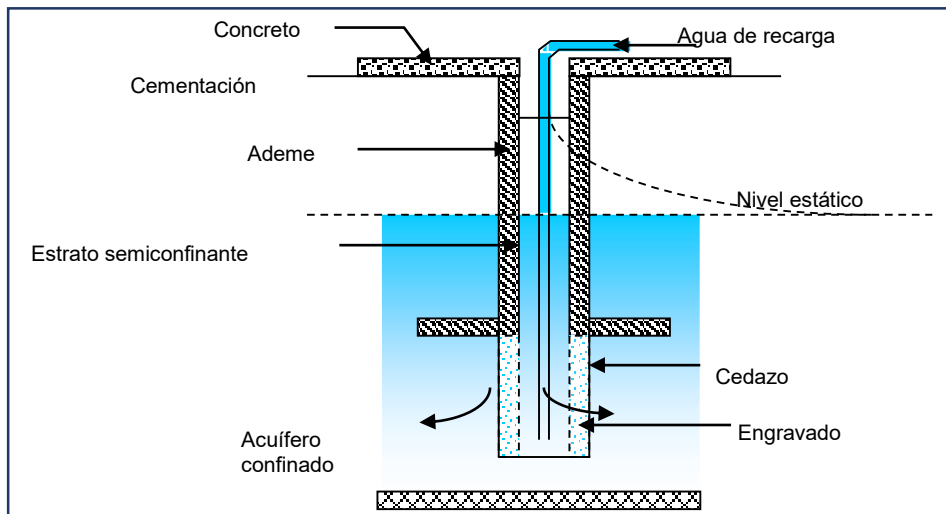


Imagen 11 Procesos de recarga subterráneos.  
Fuente: CONAGUA, Subdirección General Técnica Gerencia de Aguas Subterráneas, 2007.

## 2.1.5 Recarga gestionada al acuífero con agua renovada

En el 2005 Ian Gale, en su artículo Strategies for Aquifer Recharge (MAR), propuso la siguiente clasificación de los procesos de recarga:

- a) Sistemas superficiales o de dispersión
- b) Modificación a canales
- c) Filtración inducida en ríos
- d) Sistemas profundos o pozos**
- e) Captación de lluvia
- f) Drenaje sostenible

El proceso de recarga de interés para este trabajo se centran en el proceso de sistemas profundos o pozos.

### 2.1.5.1 Sistemas profundos o pozos

Los sistemas de inyección profunda (Ver imagen 12) son una solución común cuando el terreno disponible no es lo suficientemente amplio o la topografía no permite la instalación de un sistema de dispersión. Las técnicas más importantes de recarga profunda son: pozos abiertos de infiltración; pozos profundos y mini sondeos; sondeos; almacenamiento en el acuífero y recuperación; almacenamiento en el acuífero, transporte y recuperación.

La desventaja principal de los sistemas de recarga profunda es el elevado riesgo de contaminación al acuífero, por lo que estos sistemas exigen una calidad más elevada en el agua de recarga, pues ésta ocurre directamente a diferencia de la superficial, donde el agua atraviesa varias capas durante la infiltración, es por ello que previo a realizar la recarga, el agua debe tener al menos la calidad que presenta el agua en el acuífero, o bien la calidad necesaria en la extracción.

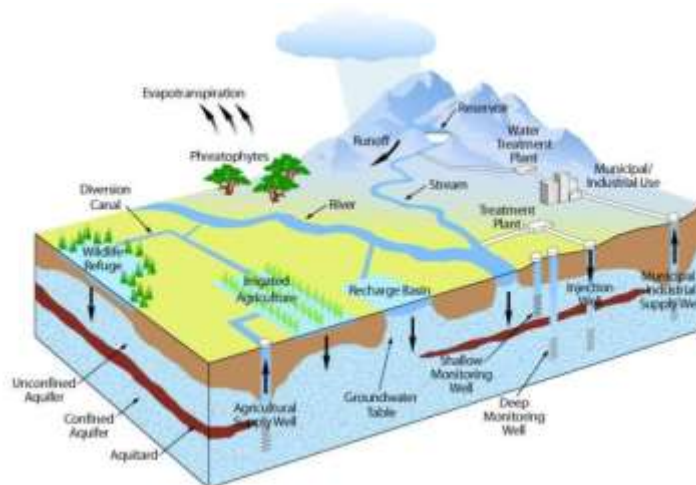


Imagen 12 Esquema representativa de pozos de inyección con agua residual renovada.  
Fuente: California Department of Water Resources.

### 2.1.6 Clasificación de acuíferos según su comportamiento hidráulico

Para seleccionar un proceso de recarga es importante tomar en cuenta la clasificación del acuífero siguiente:

- ❖ **Acuífero libre o no confinado:** es aquel acuífero que se encuentra en contacto directo con la zona subsaturada del suelo (ver imagen 13). En este tipo de acuífero la presión de agua en la zona superior es igual a la presión atmosférica.
- ❖ **Acuífero confinado:** en un acuífero confinado el agua se encuentra encerrada entre dos capas impermeables y es sometida a una presión distinta a la atmosférica.

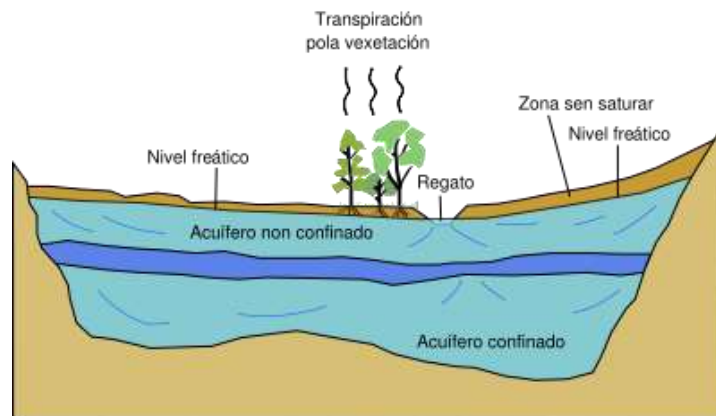


Imagen 13 Diagrama de un acuífero confinado y uno no confinado o libre.

Fuente: Hans Hillewaert, 2007.

Para dar solución a la problemática antes mencionada, en este capítulo se determina que el reúso potable indirecto es una opción viable, si el agua regenerada con tratamiento avanzado cumple con los estándares de calidad que establece la NOM-014-CONAGUA-2003, este efluente se puede reinyectar al acuífero y de esta manera se puede reestablecer los acuíferos sobreexplotados en el país.

## 2.2 SOSTENIBILIDAD DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN MÉXICO

El agua es un factor determinante en el desarrollo económico y social y, al mismo tiempo, cumple la función básica de mantener la integridad del entorno natural. A pesar de ello, el agua es sólo uno de los recursos naturales vitales y resulta por ello imperativo que los temas hídricos no sean tratados de forma aislada.

Los gestores, tanto gubernamentales como del sector privado, han de tomar decisiones complicadas sobre la asignación del agua. Con mayor frecuencia, éstos se enfrentan a una oferta que disminuye frente a una demanda creciente. Factores como los cambios demográficos y climáticos también incrementan la presión sobre los recursos hídricos. El tradicional enfoque fragmentado ya no resulta válido y se hace esencial un enfoque holístico para la gestión del agua.

Éste es el fundamento del enfoque para la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) (imagen 14), aceptado ahora internacionalmente como el camino hacia un desarrollo y gestión eficientes, equitativos y sostenibles de unos recursos hídricos cada vez más limitados y para abordar unas demandas en competición (ONU, 2009).

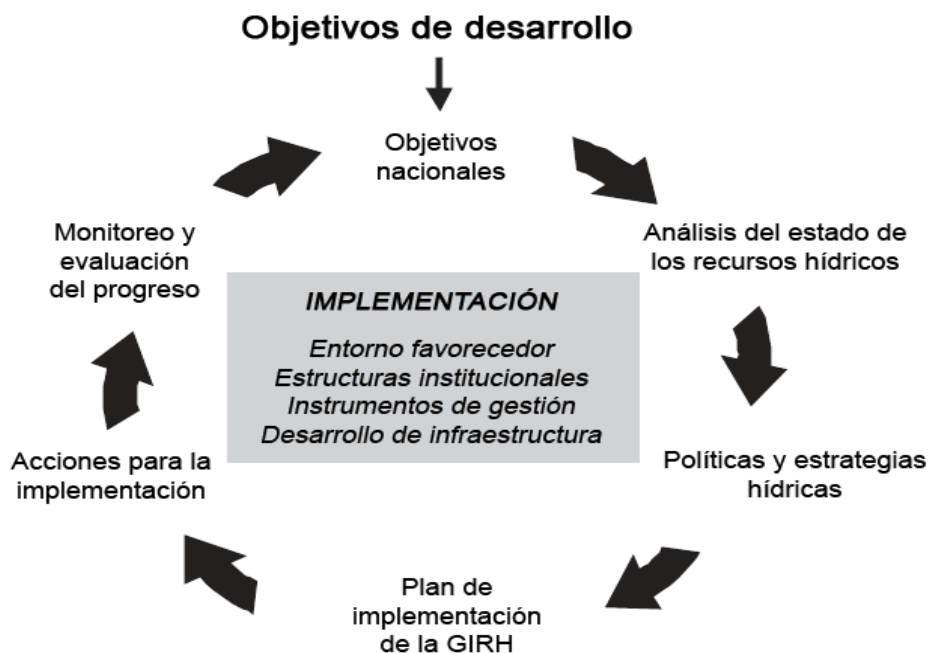


Imagen 14 Fases de la planificación e implementación de la GIRH.  
Fuente: ONU, 2009.

En México, para garantizar la seguridad y la sustentabilidad hídrica, se establecen los siguientes **objetivos** en el Plan Nacional Hídrico 2014-2018:

1. **Fortalecer la gestión integrada y sustentable del agua**
2. Incrementar la seguridad hídrica ante sequías e inundaciones
3. Fortalecer el abastecimiento de agua y el acceso a los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento
4. Incrementar las capacidades técnicas, científicas y tecnológicas del sector
5. Asegurar el agua para el riego agrícola, energía, industria, turismo y otras actividades económicas y financieras de manera sustentable
6. Consolidar la participación de México en el contexto internacional en materia de agua

Para fines de este trabajo, el objetivo de interés es “*Fortalecer la gestión integrada y sustentable del agua*”, donde se establecieron las siguientes **estrategias** para poder hacer posible el objetivo:

1. **Ordenar y regular los usos del agua en cuencas y acuíferos**
  - a) Reutilizar toda el agua residual tratada
  - b) Realizar acciones para incrementar la recarga de acuíferos

- c) Establecer reservas de aguas nacionales superficiales para la protección ecológica
- d) Fortalecer el proceso de formulación, seguimiento y evaluación de programas hídricos.
  
- e) Establecer un sistema de gestión de proyectos del sector hídrico con visión de corto, mediano y largo plazos.

## **2. Mejorar la calidad del agua en cuencas y acuíferos**

- a) Fortalecer la medición y evaluación de la calidad del agua y sus principales fuentes de contaminación.
- b) Incrementar las declaratorias de clasificación y estudios de calidad del agua y específicos de afectación.
- c) Determinar el impacto de los agroquímicos en la calidad del agua.
- d) Establecer coordinación con sectores involucrados para promover el uso adecuado de agroquímicos como medida de control de la contaminación difusa.
- e) Generar y aplicar la normativa hídrica asociada a la disposición de residuos sólidos.
- f) Incluir en las condiciones particulares de descarga un número mayor de parámetros contaminantes.
- g) Modificar la normatividad sobre descargas de aguas residuales para contribuir a un marco de sustentabilidad del agua.

Por tanto, las acciones a corto plazo que se pueden realizar para cumplir con las estrategias establecidas en el Plan Nacional Hídrico es la reutilización de agua residual para incrementar la recarga en acuíferos, donde el efluente de recarga debe cumplir con la calidad estipulada por la NOM-014-CONAGUA-2003 que además, debe contar con un monitoreo constante, para evitar contaminación de cuerpos de agua superficial.

Para cumplir con los objetivos establecidos en el PNH 2014-2018 se han planteado estrategias que deben ser atendidas con responsabilidad global, dichas estrategias son las que aparecen en el Tabla 6.

Plan Nacional Hídrico 2014-2018	Objetivo	Estrategia
	Fortalecer la gestión integrada y sustentable del agua	Ordenar y regular los usos del agua en cuencas y acuíferos.
		Ordenar la explotación y el aprovechamiento del agua en cuencas y acuíferos.
		Modernizar e incrementar la medición del ciclo hidrológico.
		Mejorar la calidad del agua en cuencas y acuíferos.
		Fortalecer la gobernanza del agua.
		Fortalecer la gobernabilidad del agua.
	Incrementar la seguridad hídrica ante sequías e inundaciones	Proteger e incrementar la resiliencia de la población y áreas productivas en zonas de riesgo de inundación y/o sequía.
		Reducir la vulnerabilidad a los efectos del cambio climático o variabilidad climática.
	Fortalecer el abastecimiento de agua y el acceso a los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento	Incrementar la cobertura de los servicios de agua potable y alcantarillado.
Mejorar las eficiencias de los servicios de agua en los municipios.		
Sanear las aguas residuales municipales e industriales con un enfoque integral de cuenca hidrológica y acuífero.		
Promover la construcción de proyectos que contribuyan a mitigar la pobreza, incluyendo la Cruzada Nacional Contra el Hambre.		
Promover los instrumentos de coordinación que propicien la certeza jurídica para garantizar el derecho humano de acceso al agua.		
Incrementar las capacidades técnicas, científicas y tecnológicas del sector	Fomentar la educación y conocimiento hídrico de la población para contribuir en la formación de una cultura del agua.	
	Impulsar la educación continua y certificación de los actores del sector hídrico.	
	Impulsar la investigación científica y el desarrollo tecnológico para el logro de los objetivos del sector.	
	Generar y proveer información sobre el agua.	
Asegurar el agua para el riego agrícola, energía, industria, turismo y otras actividades económicas y financieras de manera sustentable	Mejorar la productividad del agua en la agricultura.	
	Utilizar sustentablemente el agua para impulsar el desarrollo en zonas con disponibilidad.	
Consolidar la participación de México en el contexto internacional en materia de agua	Fortalecer la cooperación internacional para el desarrollo, el esquema de sociedad del conocimiento y la asistencia financiera internacional en el sector.	
	Consolidar la participación del sector hídrico mexicano en el diálogo político internacional.	
	Fortalecer la relación con los países vecinos para una mejor gestión transfronteriza del agua.	

Tabla 4 Estrategias ambientales del PNH, 2014-2018.

Fuente: Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018.



## 2.3 TECNOLOGÍAS EMPLEADAS EN EL TRATAMIENTO AVANZADO DE AGUA RESIDUAL

A lo largo de las últimas décadas, se han estudiado, desarrollado y aplicado una amplia variedad de tecnologías de tratamiento para la eliminación de los contaminantes presentes en el agua residual y mostrados en la tabla 4. En esta sección se presenta una clasificación de estas tecnologías.

Componentes	Efecto	Concentración crítica, mg/L
Sólidos suspendidos	Pueden provocar deposiciones de sólidos o empeorar la transparencia del agua receptora	Variable dependiendo del origen
Materia orgánica biodegradable	Pueden agotar las reservas de oxígeno disponible	Variable dependiendo del origen
Contaminantes prioritarios	Tóxicos para el hombre; carcinógenos	Varía en función del constituyente
	Tóxicos para el entorno acuático	Varía en función de la columna de agua, masa biológica, o sedimento
Compuestos orgánicos volátiles	Tóxicos para el hombre; carcinógenos; forman oxidantes fotoquímicos (smog)	Varía en función del constituyente
<b>Nutrientes</b>		
Amoniaco	Aumenta la demanda de cloro; puede convertirse a nitratos y agotar los recursos de oxígeno; con el fósforo puede llevar al desarrollo de crecimiento de algas Tóxico para los peces	Cualquier cantidad Variable <sup>a</sup>
Nitrato	Estimula el crecimiento acuático y de las algas; Puede causar metahemoglobinemia en los niños (niños azules)	0.3 <sup>b</sup> 45 <sup>c</sup>
Fosfato	Estimula el crecimiento acuático y de las algas Interfiere con la coagulación Interfiere con el ablandamiento cal-sosa	0.015 <sup>b</sup> 0.2-0.4 0.3
<b>Otros compuestos inorgánicos</b>		
Calcio y magnesio	Aumenta la dureza y los sólidos disueltos totales	
Cloro	Imparte sabor salado Interfiere en los usos agrícolas e industriales	250 75-200
Sulfato	Acción catártica	600-1000
<b>Otros compuestos orgánicos</b>		
Agentes tensoactivos	Provocan espumas y pueden interferir con la coagulación	1.0-3.0
<sup>a</sup> Depende del pH y la temperatura <sup>b</sup> Para lagos con aguas tranquilas <sup>c</sup> Para NO por la U.S. Environmental Protection Agency, Primary Drinking Water Standards.		

Tabla 5 Componentes químicos típicos que pueden encontrarse en el agua residual y sus efectos.  
Fuente: Metcalf & Eddy, 2003.

### 2.3.1 Clasificación de las tecnologías de tratamiento

Los métodos de tratamiento avanzado del agua residual se pueden clasificar en función del tipo de operación o proceso unitario, o por el objetivo principal de eliminación que se quiere conseguir. Para facilitar la comparación general de las diversas operaciones y procesos, en la tabla 5 se aporta información acerca de: (1) la principal función de eliminación de constituyentes; (2) los tipos de operaciones y procesos aplicables para desarrollar esta función; y (3) el tipo de agua residual tratada.

Principal función de eliminación	Descripción de la operación o del proceso	Tipo de agua residual tratada <sup>a</sup>
Eliminación de sólidos suspendidos	Filtración	ETP, ETS
	Microtamices	ETS
Oxidación de amoníaco	Nitrificación biológica	ETP, ETB, ETS
Eliminación de nitrógeno	Nitrificación/desnitrificación biológica	ETP, ETS
Eliminación de nitratos	Desnitrificación biológica en etapas separadas	ETS + NITRIFICACIÓN
Eliminación biológica de fósforo	Eliminación de fosforo en la línea principal <sup>b</sup>	ARC, ETP
	Eliminación de fosforo en la línea auxiliar	FAR
Eliminación biológica conjunta de nitrógeno y fosforo	Nitrificación/desnitrificación biológica y eliminación de fosforo	ARC, ETP
Eliminación física o química de nitrógeno	Arrastre por aire	ETS
	Cloración al breakpoint	ETS+FILTRACIÓN
	Intercambio iónico	ETS+FILTRACIÓN
Eliminación de fósforo por adición de reactivos químicos	Precipitación química con sales metálicas	ARC, ETP, ETB, ETS
	Precipitación química con cal	ARC, ETP, ETS
Eliminación de compuestos tóxicos y materia orgánica refractaria	Adsorción sobre carbono	ETS+FILTRACIÓN
	Fangos activado-carbón activado en polvo	ETP
	Oxidación química	ETS+FILTRACIÓN
Eliminación de sólidos inorgánicos disueltos	Precipitación química	ARC, ETP, ETB, ETS
	Intercambio iónico	ETS+FILTRACIÓN
	Ultrafiltración	ETS+FILTRACIÓN
	Ósmosis Inversa	ETS+FILTRACIÓN
	Electrodíálisis	ETS+FILTRACIÓN+ ADSORSIÓN SOBRE CARBONO
Compuestos orgánicos volátiles	Volatilización y arrastre con gas	ARC, ETP

<sup>a</sup> ETP = efluente de tratamiento primario  
 ETB = efluente de tratamiento biológico (sin decantación)  
 ETS = efluente de tratamiento secundario (con decantación)  
 ARC = agua residual cruda (no tratada)  
 FAR = lodos activado recirculado

<sup>b</sup> El proceso de eliminación se lleva a cabo en la línea de tratamiento principal en lugar de la línea auxiliar.

Tabla 6 Eliminación de constituyentes por medio de operaciones y procesos de tratamiento avanzado.  
 Fuente: Metcalf & Eddy, 2003.

## 2.4 JUSTIFICACIÓN

Los recursos hídricos en México, al igual que en el resto del mundo, se encuentran bajo una creciente presión. El crecimiento demográfico, la urbanización, suministro de agua potable, la agricultura y la industria, han aumentado significativamente el uso global del agua, produciendo la escasez.

La realización del presente trabajo se enfoca en determinar el estado del arte del reúso potable indirecto, a través del empleo de tecnología avanzada de tratamiento de agua residual empleando procesos de múltiples barreras.

Con base en el análisis de resultados obtenidos, se emitirá la selección de al menos dos tecnologías de tratamiento de agua residual que más se emplean a nivel internacional y que puedan adaptarse a las condiciones de México en corto o mediano plazo. Los procesos de múltiples barreras seleccionados deberán proporcionar un efluente con la calidad establecida como límites máximos para recarga artificial de agua al acuífero de la Norma Oficial Mexicana NOM-014-CONAGUA-2003.

La tecnología avanzada de tratamiento de agua residual seleccionada será sugerida en plantas de tratamiento existentes en el país que cuentan con sistemas de tratamiento a nivel secundario y que además se encuentren localizadas en zonas donde existan problemas con la sobreexplotación de acuíferos.

Dado a que el país enfrenta problemas de escasez y sobreexplotación de acuíferos (16%), la implementación de infraestructura tal como plantas de tratamiento con tecnología avanzada, ayudaría a mitigar y a enfrentar el desequilibrio existente entre la demanda y la disponibilidad hídrica en las distintas regiones del país.

## 2.5 BENEFICIOS ESPERADOS

El agua subterránea representa el 30% de agua dulce después de los glaciares con 68.7% y es por tanto nuestra fuente más grande de almacenamiento y abastecimiento. La gestión del agua subterránea tiene como fin la sustentabilidad, para ello se deben cumplir dos principios: i) Lograr el equilibrio entre la cantidad de agua recargada a los acuíferos y la cantidad extraída y ii) Proteger los cuerpos de agua de la contaminación.

El efluente proveniente de una planta de tratamiento empleando procesos de tecnología avanzada y que cumple con estándares de calidad de agua potable puede tener múltiples usos tales como: la recarga artificial en acuíferos. La recarga artificial del acuífero tiene como objetivos reducir, detener, o incluso revertir el abatimiento de los niveles freáticos, mejorar la calidad del agua en acuíferos contaminados y mitigar su sobreexplotación, proteger el agua dulce de la intrusión del agua salada en las regiones costeras, detener el hundimiento del terreno provocado por el decaimiento del nivel del manto freático y almacenar agua superficial, incluyendo agua tratada y de origen pluvial para su uso posterior.

La recarga artificial del acuífero es la herramienta usada para lograr un equilibrio entre las recargas y descargas que sufre un acuífero (imagen 15). En la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH), la gestión del agua subterránea es indispensable ya que:

- a) El agua superficial y la subterránea están fuertemente ligadas,
- b) El agua subterránea es más confiable que la superficial en temporada de estiaje, y
- c) La contaminación del agua subterránea puede durar siglos, reduciendo las fuentes para las generaciones futuras.

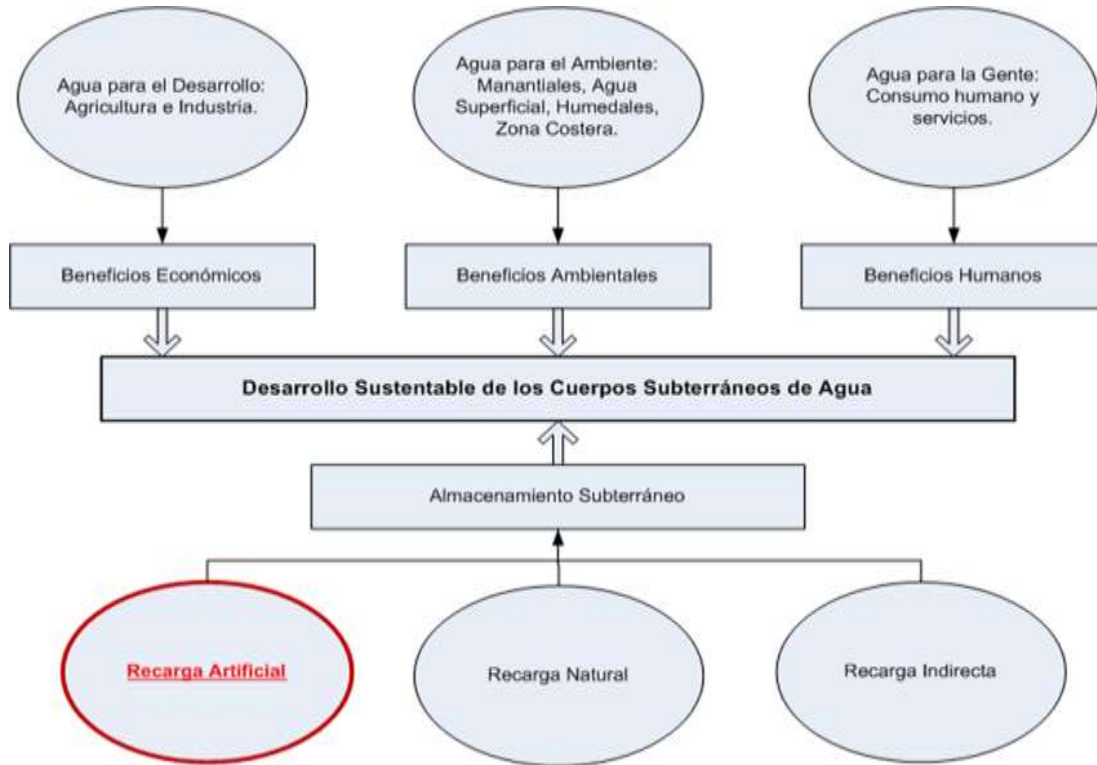


Imagen 15 Desarrollo sustentable del agua subterránea.  
 Fuente: UN International Network for Capacity Building in IWRM, 2010.

Al implementar la inyección de agua al acuífero con agua residual tratada proveniente de tecnología avanzada utilizando procesos de múltiples barreras, se logrará el desarrollo sustentable de los cuerpos subterráneos de agua en el país.

En México se tienen serios problemas con las fuentes de agua subterráneas, con el fin de dar solución se establece que el reúso potable indirecto es una opción viable, para ello se realizó un análisis de la infraestructura en el país donde se encontró que existen 2,287 plantas de tratamiento de agua residual con las cuales sólo se puede tratar un 50.2% de agua residual generada por la población, donde los procesos de tratamiento de estas plantas son: lagunas de estabilización y lodos activados.

Alrededor del mundo se ha implementado el reúso potable indirecto y a resultado exitoso, estos países emplean sistemas de barreras múltiples a base de tecnología avanzada de tratamiento para conseguir efluentes de alta calidad que cumplan con los estándares establecidos por su regulación.

Es necesario que en México se comience a adoptar la tecnología que se utiliza en los países donde este tipo de reúso tiene éxito, para ello se establecen los siguientes objetivos que nos permitirán dar solución a la problemática planteada.

## CAPÍTULO 3. OBJETIVOS

### 3.1 Objetivo general

Determinar el estado del arte del reúso potable indirecto y su posible aplicación para potencializar este tipo de reúso en México.

### 3.2 Objetivos particulares

- ❖ Determinar los principales parámetros que inciden tanto en los criterios internacionales como las normas nacionales en materia de calidad que debe tener el agua destinada al reúso indirecto.
- ❖ Establecer los sistemas de barreras múltiples empleados a nivel internacional en materia de reúso indirecto y que han sido exitosos.
- ❖ Conocer las eficiencias de remoción de contaminantes que alcanzan cada una de las etapas que integran el sistema de barreras múltiples utilizado en el reúso indirecto.
- ❖ Evaluar y seleccionar el o los métodos de tratamiento para el reúso indirecto que puedan adaptarse a las necesidades de México para garantizar la calidad de agua a recargar e implementar proyectos de recarga.

## CAPÍTULO 4 METODOLOGÍA

En este apartado se presenta los criterios internacionales en materia de recarga de acuífero así como la normatividad existente de los parámetros clave de calidad de agua con fines de recarga al acuífero. Así mismo, contienen ocho casos de estudio de éxito en el tema de reúso indirecto a nivel internacional para dar cabida al tipo de tecnología de potabilización del agua que se emplea en el sistema de barreras múltiples de los casos de estudio analizados.

### **4.1 ASPECTOS NORMATIVOS A CONSIDERAR EN TODO PROYECTO DE RECARGA DE ACUÍFEROS**

Sin duda alguna, la calidad del agua es la variable fundamental del medio hídrico, donde se evalúan características microbiológicas, organolépticas, orgánicas, inorgánicas físicas, químicas, radioactivos entre otros y se define su uso o potencial de riesgo.

La calidad es un atributo que se define en función del uso que se le asigna (por ejemplo, como agua potable, para recreación, para uso agrícola, industrial e inyección a un acuífero), lo que implica necesariamente estándares de calidad específicos para los distintos usos. Esta definición ha dado lugar a diversa normatividad, para asegurar la calidad suficiente para determinados usos y quedan englobadas en experiencias internacionales y nacionales.

#### **4.1.1 Internacional**

Dado que todos los sitios de estudio tienen características únicas que los diferencian entre sí; las exigencias en la calidad del agua de recarga cambian de un lugar a otro. En el ámbito internacional revisaron las siguientes regulaciones por tratarse de las más relevantes y además se analizan casos de estudio en estos países, a saber, la reglamentación de la World Health Organization (organismo especializado que forma parte de la ONU), US Environmental Protection Agency (Estados Unidos), Water Framework Directive (Unión Europea) y Department of the Environment del Gobierno Australiano (Australia), otras a considerar en un futuro es la Brasileña.

##### **❖ World Health Organization**

La Organización Mundial de la Salud (*WHO*, por sus siglas en inglés) es un organismo especializado de las Naciones Unidas (ONU), esta a su vez tiene relación con las organizaciones internacionales de salud pública. La WHO es responsable del informe mundial de la salud y además, trabaja en aspectos del agua, saneamiento e higiene, donde la carga de salud es alta. La WHO establece en el documento *Guidelines for Drinking Water Quality*, basado en 50 años de experiencia sobre la calidad del agua potable, y que con ello a formado una base autorizada para el establecimiento de las regulaciones nacionales y las normas para la seguridad del agua en apoyo de la salud pública, es decir, los países toman

como referencia los lineamientos de calidad del agua publicados en este documento para determinar los límites máximos permitidos en su nación.

#### ❖ **Estados Unidos**

La Agencia de Protección al Medio Ambiente (EPA, *por sus siglas en inglés*) es el ente encargado de regular la descarga y tratamiento del agua residual bajo la ley de agua limpia (Clean Water Act, CWA *por sus siglas en inglés*). El Sistema Nacional de Eliminación de Descarga de Contaminantes (National Pollutant Discharge Elimination System, NPDES *por sus siglas en inglés*) emite permisos a todos los descargadores del agua residual e instalaciones de tratamiento. Estos permisos establecen límites de descarga específicos, seguimiento y presentación de informes y podrán exigir que estas instalaciones para llevar a cabo medidas especiales para proteger el medio ambiente frente a los contaminantes dañinos.

La Safe Drinking Water Act (SDWA, *por sus siglas en inglés*) es la ley federal principal que garantiza la calidad del agua potable de los estadounidenses. Bajo SDWA, la EPA establece los estándares para calidad del agua potable y supervisa los estados, localidades y proveedores de agua que aplican esas normas.

#### ❖ **Unión Europea**

La Directiva Marco del Agua (WFD, *por sus siglas en inglés*) de la Unión Europea, representa el marco que rige las políticas de agua en UE. Entre los principales objetivos de la WFD se encuentran:

- El agua subterránea deben lograr un "buen estado cuantitativo" y "buen estado químico" (es decir, no contaminado) en 2015. Los cuerpos de agua subterránea se clasifican como "buena" o "mala".
- La gestión del agua sostenible a largo plazo basado en un alto nivel de protección al medio ambiente acuático, incluyendo agua superficial y agua subterránea.
- Protección, mejora y restauración de todos los cuerpos de agua; sin causar daños en el estado de agua superficial y subterránea.
- Reducción progresiva de la contaminación de sustancias prioritarias y la eliminación de sustancias peligrosas prioritarias en aguas superficial y la prevención y limitación de la entrada de contaminantes en el agua subterránea.

#### ❖ **Australia**

El Departamento de Medio Ambiente del Gobierno australiano, se encarga de la gestión de la calidad de los recursos hídricos, donde se establece las Estrategias de Gestión de la Calidad del Agua Nacional (National Water Quality Management Strategy, *por sus siglas en inglés*) en este documento se proporciona la información y herramientas para ayudar a las comunidades a manejar sus recursos hídricos para satisfacer las necesidades actuales y futuras. En Australian Drinking Water Guidelines se establecen parámetros de calidad del



agua, aunque no son normas obligatorias; proporcionan una base para la determinación de la calidad del agua.

#### 4.1.2 Nacional

La Comisión Nacional de Agua (CONAGUA) es el órgano regulador para la gestión integral de los recursos hídricos de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), que tiene como misión preservar las aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes para su administración sustentable y garantizar la seguridad hídrica con la responsabilidad del gobierno federal y la sociedad en general.

Con respecto a la recarga de los acuíferos, la SEMARNAT expidió las Normas Oficiales Mexicanas:

- ❖ La NOM-014-CONAGUA-2003, establece los requisitos que deben cumplir con la calidad del agua, la operación y el monitoreo utilizados en los sistemas de recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada.
- ❖ La NOM-015-CONAGUA-2007 regula las características y especificaciones de las obras y del agua para la infiltración artificial de agua a los acuíferos.

Cabe mencionar que todo proyecto de recarga artificial en México, debe cumplir con los parámetros de calidad de la NOM-127-SSA1-1994, donde se establece los parámetros para considerar un agua de uso potable, además de los especificados en la NOM-014-CONAGUA-2003 (Ver tabla 7).

Tabla 7 Calidad del agua residual tratada para recarga artificial si no existen captaciones a 1.0 km o menos de distancia al sitio de recarga (NOM-014-CONAGUA-2003).

Fuente: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2009.

Tipo de Contaminante	Tipos de Recarga	
	Superficial / Subsuperficial	Directa
Microorganismos Patógenos	Remoción o inactivación de microorganismos entero patógenos.	Remoción o inactivación total de microorganismos entero patógenos.
Contaminantes Regulados por Norma	Límites permisibles NOM-127-SSA1-1994.	Límites permisibles NOM-127-SSA1-1994.
Contaminantes No Regulados por Norma	DBO5 ≤ 30mg/l, COT = 16mg/l	COT ≤ 1mg/l

En la tabla 22 del anexo se presentan los parámetros y límites regulados por las agencias, además se realiza una comparación de los criterios internacionales con respecto a las normas nacionales en materia de calidad que debe tener el agua destinada para reúso indirecto, y en la tabla 9 se presentan sólo algunos de los parámetros más importantes.

Cabe mencionar que la calidad requerida para la recarga de agua al acuífero debe de cumplir los estándares de agua potable, ya que el agua que se inyecta debe tener la misma

calidad que el agua que se encuentra en el acuífero, para evitar la contaminación de un manto de agua subterránea.

Como ya se mencionó anteriormente la calidad es variable de un lugar a otro al igual que las exigencias en la calidad que implica un diferente intervalo de concentración así como una variabilidad en el número de parámetros a considerar, por ejemplo: en Estados Unidos, La Agencia de Protección al Medio Ambiente evalúa 97 parámetros, la Unión Europea tan solo 52, en Australia se evalúan 97 y en México se evalúan 112 parámetros. Los parámetros regulados están divididos por grupos como son los: microbiológicos, organolépticos, fertilizantes, fisicoquímicos, orgánicos, inorgánicos, plaguicidas, subproductos de la desinfección y radioactivos (Ver tabla 8).

Parámetro	Número de parámetros evaluados			
	Estados Unidos	Unión Europea	Australia	México
Microbiológicos (12)	6	5	3	11
Organolépticos (2)	2	2	2	2
Fertilizantes (1)	0	0	1	0
Fisicoquímicos (6)	4	4	3	3
Inorgánicos(32)	23	24	24	30
Orgánicos (56)	31	9	20	33
Plaguicidas (58)	21	4	32	23
Desinfectantes (3)	2	0	3	1
Subproductos de la desinfección (15)	4	2	5	5
Radiactivos (11)	4	2	1	4
Total	97	52	94	112

Tabla 8 Número de parámetros evaluados por cada ente regulador.

### ***México vs Estados Unidos***

En la comparativa realizada en la tabla 6, se puede observar que el número de parámetros evaluados por México y Estados Unidos son similares al igual que los límites establecidos (ver Tabla 9), existen casos excepcionales donde los límites máximos suelen ser más rígidos o más flexibles, por ejemplo: el los parámetros organolépticos como el color, Estados Unidos establece 20 unidades como máximo en la escala de platino cobalto y México permite solo 15, por otro lado, en el parámetro fisicoquímico como sólidos disueltos totales, México suele ser más flexible dado a que acepta 1000 mg/L y Estados Unidos, establece como límite máximo 500 unidades.

### ***México vs Unión Europea***

En la comparación realizada de México con la Unión Europea se puede observar que el número de parámetros evaluados por México es el doble de los evaluados por la Unión Europea, esto se debe a múltiples factores (gasto, clima, destino final, tipo de uso, etc.), pero, en los parámetros que coinciden en la evaluación las exigencias o límites de detección son similares, aunque de igual forma existen variaciones tal como se puede observar en los

parámetros inorgánicos como los Sulfatos ( $\text{SO}_4^-$ ), México suele ser más flexible ya que acepta hasta 400 mg/L y la Unión Europea tan solo 250 mg/L.

### ***México vs Australia***

Por último, en la comparación realizada de México con Australia se puede observar que el número de parámetros evaluados es similar, y que al igual que en las comparaciones anteriores existen variaciones en los límites establecidos por las agencias reguladoras, estas exigencias pueden ser más rígidas o más flexibles debido a que su concentración (alta o baja) no es perjudicial a la salud humana o causa daños a ecosistemas y seres vivos.

Tabla 9 Parámetros de calidad de agua regulados por agencias a nivel Internacionales y Nacional.

Parámetro		Unidad	Estados Unidos (94 parámetros referidos)	Unión Europea (52 parámetros referidos)	Australia (97 parámetros referidos)	México (112 parámetros referidos)
Microbiológicos (12)	Organismos coliformes fecales, E. coli u organismos termotolerantes	NMP/100 mL	Ausencia o no detectable	0	Ausencia o no detectable	Ausencia o no detectable
	<i>Giardia lamblia</i>	Quistes	99.9% Remoción	NE	NE	0
	<i>Cryptosporidium</i>	Quistes	99% Remoción	0	NE	0
	Virus entéricos	UFC/100 mL	99.99% Remoción	NE	NE	0
Organo-lépticos (2)	Color	Pt-Co	15	Agradable	15	20
Físico-químicos (6)	Conductividad	( $\mu\text{S/cm}$ a 20°C)	NE	2500	NE	NE
	SDT	mg/L	500	NE	600	1000
	Turbiedad	UTN	5	Agradable	5	5
Inorgánicos(32)	Aluminio	mg/L	0.05 a 0.2	0.2	0.2	0.2
	Amonio	mg/L	NE	0.5	0.5	NE
	Antimonio	mg/L	0.006	0.005	0.003	0.006
	Arsénico	mg/L	0.01	0.01	0.01	0.05
	Asbesto		7	NE	NE	7
	Bario	mg/L	2	3	2	0.7
	Berilio	mg/L	0.004	NE	0.06	0.004
	Boro	mg/L	NE	1	4	0.3
	Cadmio	mg/L	0.005	0.005	0.002	0.005
	Cianuros (como CN-)	mg/L	0.2	0.05	0.08	0.07
	Cloruros (como Cl-)	mg/L	250	250	250	250
	Cromo total	mg/L	0.1	0.05	0.05	0.05
	Fierro	mg/L	0.3	0.2	0.3	0.3
	Fluoruros (como F-)	mg/L	4	1.5	1.5	1.5
	Mercurio	mg/L	0.002	0.001	0.001	0.001
	Nitratos (como N)	mg/L	10	11.3	NE	10
	Plomo	mg/L	0.015	0.01	0.01	0.01
	Sodio	mg/L	NE	200	180	200
	Sulfatos (como SO <sub>4</sub> -)	mg/L	250	250	250	400

Parámetro		Unidad	Estados Unidos (94 parámetros referidos)	Unión Europea (52 parámetros referidos)	Australia (97 parámetros referidos)	México (112 parámetros referidos)
Orgánicos (56)	1,2-dicloroetano	µg/L	NE	NE	NE	NE
	Acrilamida	µg/L	0.5	0.1	0.2	0.5
	Benceno	µg/L	5	1	1	10
	Cloruro de vinilo	µg/L	2	0.5	0.3	2
Plaguicidas (58)	2,4 - D	µg/L	70	NE	30	30
	Clordano (total de isómeros)	µg/L	2	NE	2	0.2
	Glifosato	µg/L	700	NE	1000	700
	Heptacloro epóxido y de heptacloro	µg/L	0.4 para heptacloro y 0.2 para epóxido	0.03	0.3	0.03
Desinfectantes (3)	Cloro	mg/L	4	NE	5	NE
Subproductos de la desinfección (15)	Bromato	mg/L	0.01	0.01	0.02	0.01
Radiactivos (11)	Uranio	mg/L	0.03	NE	0.017	30

## 4.2 CASOS DE ESTUDIO DE PROYECTOS DE REÚSO INDIRECTO ANALIZADOS

Debido a la importancia del tipo de recarga (reúso indirecto) se establece con base en las características propias del lugar, cada caso de estudio posee características únicas que definen las tecnologías que se aplican. Sin embargo, se puede agrupar los casos de acuerdo a algunas características comunes, por ejemplo, la tecnología utilizada. Para ejemplificar lo antes dicho se describen a continuación algunos proyectos de recarga importantes por su relevancia histórica.

### 4.2.1 OCWD, Sistema de reabastecimiento de agua subterránea (ampliación de la planta Water Factory 21)

El Sistema de Reabastecimiento de Aguas Subterráneas (Groundwater replenishment system, GRS, *por su sigla en inglés*) es el mayor proyecto a nivel mundial para la reutilización planificada de agua potabilizada en forma indirecta. GWRS es una ampliación de Water Factory 21, esto debido a la amenaza del agua salada del océano, que puede contaminar la cuenca de agua subterránea del Condado de Orange. El proyecto de purificación de agua se realiza mediante tecnología de punta se encuentra en operación desde enero de 2008. Aproximadamente el 50% de agua regenerada se bombea a pozos de inyección donde sirve como una barrera contra la intrusión de agua de mar. El otro 50% bombean para recargar cuencas en Anaheim (Ver Mapa 7) (Groundwater replenishment system, 2015).

El bombeo excesivo de agua de la cuenca aumenta la posibilidad de que el agua salada se filtre en la cuenca. Con la finalización de la GWRS, OCWD ahora produce suficiente agua para formar una barrera altamente protectora que protege el suministro de agua del Condado de Orange.

El agua residual suministrada a la planta GWRS es efluente secundario proveniente de la planta N.1 de la OCSD en Fountain Valley, esta planta de tratamiento tiene una capacidad de 643, 733 m<sup>3</sup>/d.



Mapa 7 Recarga de cuenca en Anaheim.

Fuente: OCWD, Groundwater replenishment system.

### Cantidad

En el 2015, GWRS se amplió aún más para producir un adicional de 113,600 m<sup>3</sup>/d, en total produce 379,000 m<sup>3</sup>/d. Es suficiente agua para abastecer a 850,000 personas.

### Calidad

El proceso produce agua de alta calidad que cubre todos los estándares estatales y federales para el agua de consumo humano (Tabla 4).

### Tecnología de Tratamiento

El proceso de tratamiento avanzado consiste en tres pasos microfiltración, ósmosis inversa, y desinfección con luz ultravioleta y peróxido de hidrógeno (imagen 16).

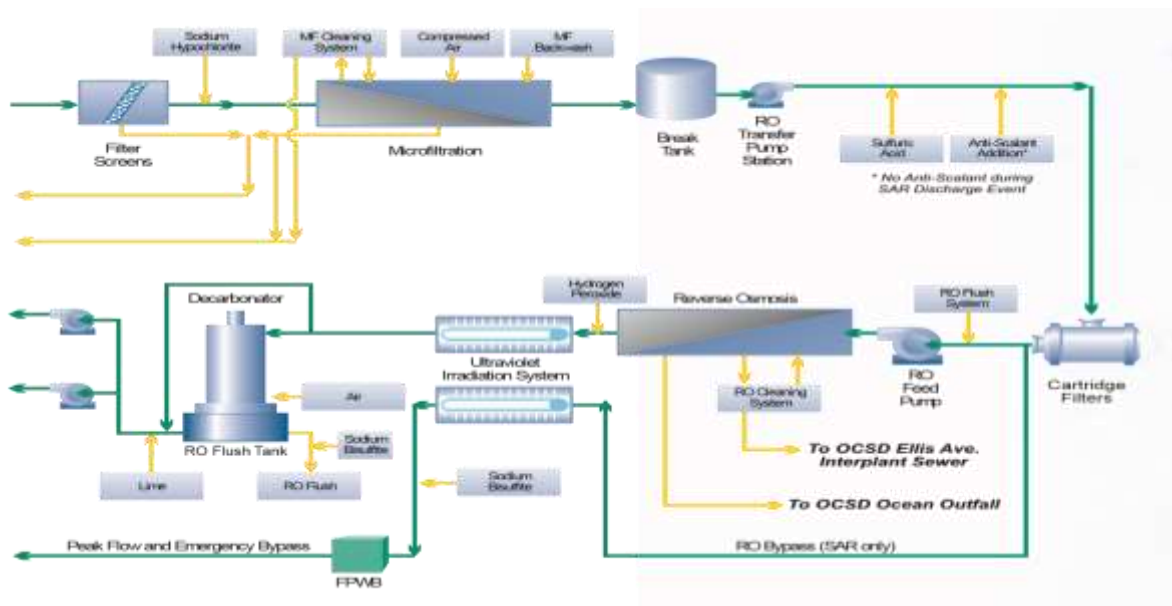
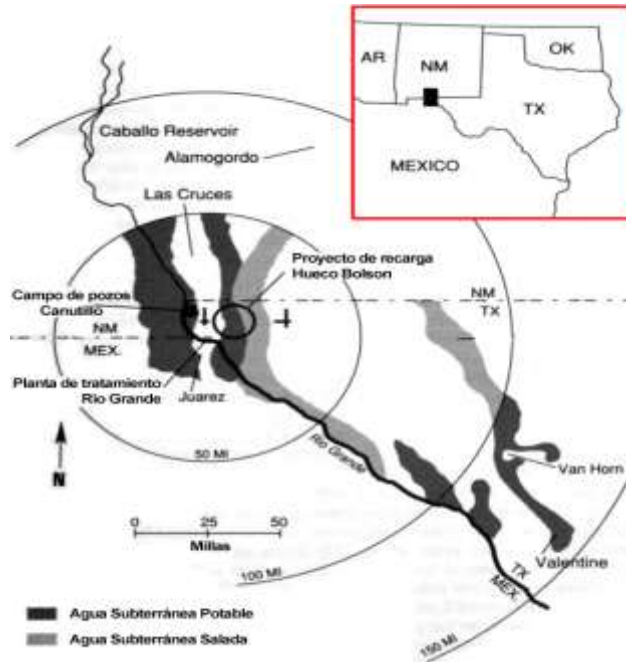


Imagen 16 Diagrama de flujo de Orange County Water District, Groundwater replenishment system.  
Fuente: Groundwater replenishment system consultar en <http://www.gwrssystem.com/>, 2015

#### 4.2.2 El Paso, Texas: el primero de EE.UU.

El proyecto de recarga del acuífero del Paso, Texas (Ver mapa 8), es el primer proyecto de inyección en Estados Unidos con el objetivo de aumentar el nivel del manto freático para el almacenamiento usando agua residual tratada como fuente de recarga, debido al déficit de agua en la zona y a que no se puede satisfacer cabalmente las demandas hídricas de la población (National Research Council, 1994).



Mapa 8 Proyecto de recarga de El Paso, Texas.

Fuente: *National Research Council*, 1994.

La ciudad de El Paso, ubicada al oeste del estado de Texas, y en colindancia con la frontera mexicana, posee un ambiente sumamente árido, su principal fuente de abastecimiento de agua potable (90%) proviene de la explotación del acuífero Hueco-Mesilla Bolsón, el cual también abastece a Ciudad Juárez (México). Debido a estos dos grandes consumidores y al gran volumen de extracción, la capa de agua potable disponible en el acuífero de El Paso se ha reducido significativamente dando lugar a la infiltración del agua salina que lo rodea. La demanda total de agua de El Paso es de 4.4 m<sup>3</sup>/s, de estos son tratados cerca de 2.2 m<sup>3</sup>/s de agua residual (50%), de tal manera que es posible reusar el recurso para recargar el acuífero Hueco-Mesilla Bolsón.

Una de las plantas de tratamiento del Paso es "Fred Hervey", que tiene una capacidad de 0.4 m<sup>3</sup>/s para recargar el acuífero. La planta consta de dos trenes de tratamiento de 0.2 m<sup>3</sup>/s, que incluyen un sedimentador primario, un sistema de dos fases de carbón activado en polvo, tratamiento con cal, filtros de arena, desinfección con ozono, y carbono granular activado.



### *Operación*

El proyecto de recarga de El Paso es un sistema de inyección directa de 0.4 m<sup>3</sup>/s, que fue elegido por encima de un proceso superficial de recarga debido a la profundidad del nivel freático del agua (107 m por debajo de la superficie). El sistema consiste en una planta de tratamiento avanzado, que mediante un sistema de conducción, lleva el agua a través del Huevo Bolsón y la reinyecta mediante 10 pozos de inyección. El agua inyectada debe viajar 1.2 km a través del acuífero para ser extraída en los pozos de abastecimiento municipal, además, una fracción del agua tratada está disponible directamente para su uso en la industria, así como para el riego de un campo de golf.

El objetivo del proyecto de recarga es incrementar la fuente de abastecimiento con el menor riesgo social y ecológico. Los criterios básicos para lograrlo fueron: recuperación de la máxima cantidad de agua recargada para minimizar los costos y asegurar un tiempo de residencia suficiente para dar lugar a una filtración natural adicional; la separación de 1.2 km entre el sitio de recarga y los pozos de extracción dan al agua 6 años de residencia en el acuífero, lo cual es más que suficiente para cumplir lo propuesto. El agua recuperada es clorada antes de usarse, con ningún otro tratamiento adicional, lo que proporciona una calidad final tipificada como segura. Después de casi 10 años de operación no se ha presentado ningún problema operacional.

### *Fuente del agua de recarga*

La planta de tratamiento Fred Hervey está diseñada para reciclar el agua usada por los residentes de la zona noreste de El Paso, las características del influente indican un agua residual preponderantemente doméstica y con una proporción mínima de agua residual industrial. Para evitar la presencia de componentes altamente tóxicos en el agua, se ha llevado a cabo una extensiva campaña pública así como un fortalecimiento en la regulación de las descargas industriales.

### *Cantidad*

Los pozos inyectan alrededor de 44.16 L/s los cuales se bombean periódicamente en sentido contrario para su limpieza. No han existido problemas de rendimiento.

### *Calidad*

La calidad del agua producida por la planta de tratamiento avanzado Fred Hervey es monitoreada continuamente, el valor de los parámetros del agua renovada son comparables a los encontrados en el acuífero y cumplen con la regulación estatal y federal de agua potable.

### 4.2.3 West Basin Municipal Water District en California

La sequía a finales de 1980 y principios de 1990 en el sur de California que motivó a los residentes locales explorar métodos innovadores para poder llevar agua a esta región árida. El reciclaje del agua en West Basin Board tomó la decisión de diversificar y controlar una parte de su suministro de agua. Esta innovación continúa hoy como West Basin puede presumir de suministro de agua que consiste en agua subterránea desalada, la conservación, el reciclaje y pronto, la desalinización del agua del océano (Valentina Lazarova, Takashi Asano, Akica Bahri, John Anderson, 2013).

West Basin es la única planta de reciclaje de aguas residuales en el mundo para producir cinco tipos diferentes de aguas de diseño, incluyendo:

1. Agua Terciaria (Title 22) para una amplia variedad de usos industriales y de riego;
2. Agua nitrificada para torres de refrigeración industriales;
3. Agua ablandada de ósmosis inversa: el agua residual secundaria tratada purificada por microfiltración (MF), seguido por ósmosis inversa (OI), y la desinfección para recarga de aguas subterráneas;
4. Ósmosis Inversa pura para la refinería de baja presión del agua de alimentación de calderas; y
5. Ósmosis inversa ultra-pura para el agua de alimentación de calderas de la refinería de alta presión.

#### *Cantidad*

La instalación produce más de 151, 600 m<sup>3</sup>/d, lo suficiente para cubrir las necesidades de 950,000 personas durante un año. West Basin abastece el 75% del agua que se inyecta en la barrera de la costa oeste de Aguas Subterráneas conservando 5,000 acres-pies de agua cada año.

#### *Calidad*

En West Basin no realizan pruebas de calidad del agua en el agua potable, pero supervisa las pruebas y presentación de informes de Metropolitan Water District. Metropolitan Water District ha sido proveedor de alta calidad, agua potable confiable que cumple todas las regulaciones federales y estatales de agua potable en el sur de California. El uso de tecnologías de tratamiento avanzadas ha dado hincapié un mayor monitoreo para poder cumplir estrictas leyes y lineamientos (The Metropolitan Water District).

#### *Tecnología de tratamiento del agua*

Los procesos de tratamiento implica un sistema de múltiples barreras que imita proceso de purificación de la naturaleza, los procesos son: microfiltración, ósmosis inversa y desinfección con rayos UV (Imagen 17).

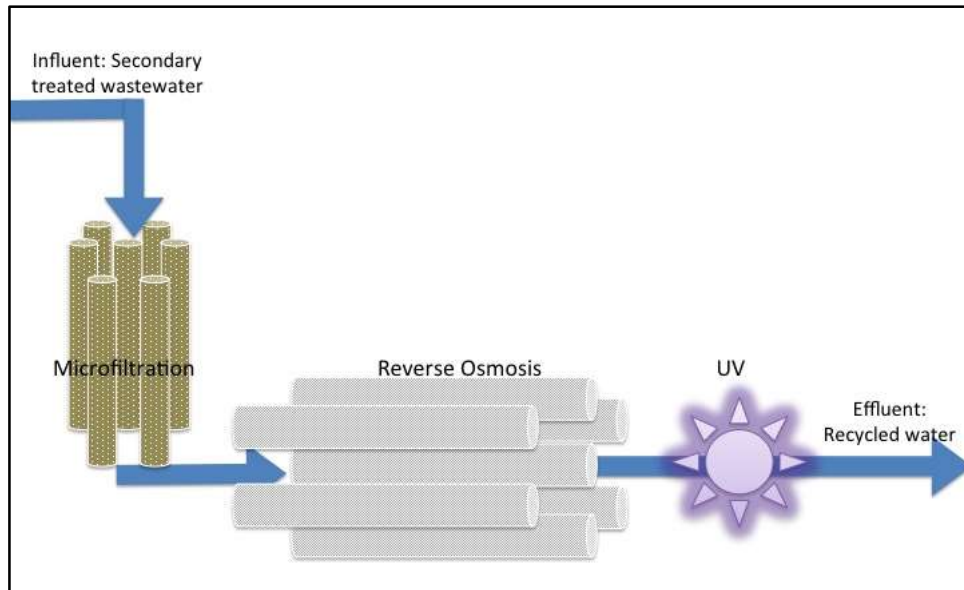


Imagen 17 Barreras múltiples que integran la planta West Basin Municipal Water District.

Fuente: West Basin Municipal Water District, 2015.

#### 4.2.4 Windhoek, Namibia: integración de la recarga artificial en la gestión de los recursos hídricos

Windhoek es la capital y ciudad más grande de la República de Namibia, al sur de África, con una población de 230,000 habitantes y una demanda de 20 Mm<sup>3</sup>/año (millones de metros cúbicos por año 634.2 L/s) (South Africa's Artificial Recharge Information Centre, 2007). La Ciudad ha optado por un proyecto de recarga a gran escala antes de implementar otras opciones como importar agua desde el norte del país. Esta decisión fue tomada basándose en el costo económico que la recarga artificial representa y en la mejor relación costo-efectividad para asegurar el abastecimiento de la Ciudad.

El riesgo de perder agua inyectada es casi inexistente, puesto que el acuífero está rodeado por formaciones geológicas con baja permeabilidad y la ciudad de Windhoek es el único usuario del acuífero. Para la realización de este proyecto, además de los estudios técnicos, se realizaron estudios financieros para conocer la opción económicamente más viable.

##### *Operación*

El sistema utilizado de acuerdo con las características del subsuelo (el primero a nivel mundial en realizarse en un acuífero fracturado de cuarcita) fue la recarga directa usando pozos de inyección. En 1996 se hicieron las primeras pruebas de inyección, a la fecha no ha habido problemas operativos y han obtenido resultados de monitoreo muy satisfactorios.

##### *Fuente del agua de recarga*

El agua que se usa como para la recarga proviene principalmente de presas que funcionan como un sistema de almacenamiento con lo cual se reduce significativamente la evaporación a diferencia de los almacenamientos superficiales.

### *Cantidad*

La capacidad instalada del sistema de recarga es de 8 Mm<sup>3</sup>/año (253.7 L/s), equivalente al 40% de la cantidad extraída para consumo; una cifra importante considerando que esto se suma a la recarga natural que tenga el acuífero.

### *Calidad*

El agua inyectada en el acuífero presenta una conductividad de 50 mS/m y un carbono orgánico disuelto de 4 mg/L. Por su parte, a la salida, la conductividad del agua es de 60 mS/m y presenta valores de carbono orgánico disuelto menores a 2 mg/L.

La importancia de haber realizado un análisis extensivo de las características hidrogeológicas del sitio de estudio ayudó a evitar el riesgo de perder agua inyectada y aprovechar la conducción subterránea del líquido

## **4.2.5 Adelaide, Australia: Recarga artificial del acuífero con agua tratada**

Las actividades hortícolas de la región de Bolívar en el sur de Australia han utilizado agua subterránea para la irrigación (Mapa 9). La expansión de estas actividades en el área requería de fuentes adicionales de abastecimiento y la PTAR de Bolívar fue identificada como una buena alternativa. El uso de agua tratada para riego requiere según la legislación australiana, de tratamiento terciario previo a su uso. Desde 1999, el agua producida por este tratamiento es usada para irrigación, no obstante, las plantas de tratamiento terciario no se dan abasto para satisfacer la demanda actual. Es por ello que almacenar el agua sobrante de la PTAR, producida durante el invierno, en un acuífero, fue visto como una posibilidad factible para satisfacer la demanda durante el año; por lo anterior, se inició el proyecto de recarga, almacenamiento y recuperación de Bolívar, Australia.



Mapa 9 Ubicación del sistema de recarga Bolívar.  
Fuente: Page & Dillon, 2010.

### *Operación*

El sistema de recarga de Bolívar está ubicado 25 km al norte del centro de la ciudad de Adelaide (1.25 M hab.) en el sur de Australia. El agua de recarga es producto del tratamiento terciario del agua residual de las ciudades de Salisbury y Adelaide, ésta se recarga directamente a través de un pozo a un rango de profundidad de 103-160 m. El acuífero es confinado y está compuesto principalmente por rocas calizas. Ya que el uso que se le da al agua recuperada es el de riego, el sistema no considera ningún tratamiento posterior a la recuperación.

### *Fuente del agua de recarga*

El agua residual proveniente de las ciudades de Salisbury y Adelaide es bombeada a la PTAR Bolívar, donde recibe un tratamiento primario (sedimentación) seguido por un proceso de lodos activados. El agua tratada es conducida a lagunas de estabilización donde permanece por 30 días. Finalmente se da un tratamiento terciario (floculación, oxígeno disuelto y filtración), el efluente es clorado y almacenado en una laguna previa al sistema de irrigación. A partir de ahí se bombea al sistema de riego y/o al sistema de recarga al acuífero.

La capacidad de recarga de acuerdo con los estudios de factibilidad se encuentra entre los 160 a 320 L/s.

### *Calidad*

Los parámetros de calidad del agua de recarga, del agua contenida naturalmente en el acuífero y del agua recuperada del sistema de recarga Bolívar cumplen con los estándares de calidad que establece el Departamento de Medio Ambiente del Gobierno australiano.

El caso de recarga en la provincia de Adelaide en Australia es un buen ejemplo de un uso de la recarga artificial del acuífero como un sistema de almacenamiento, que a diferencia de los reservorios superficiales, se encuentra libre de fenómenos como la evaporación y la contaminación. Cabe destacar el exigente proceso de tratamiento que se realiza sobre el agua a recargar, asegurando mantener e incluso mejorar la calidad del recurso presente en el acuífero y con esto omitir el tratamiento posterior a su extracción.

### **4.2.6 Nardó, Italia**

Nardó es una ciudad con 30,000 habitantes localizada a 50 km al sur de Lecce, una de las regiones más secas de Italia con precipitación anual menor a 600 mm (1950-2000). El consumo de agua potable se distribuye entre las cuatro principales actividades de la región: Agricultura 1,400 Mm<sup>3</sup>/año (58%), uso urbano 580 Mm<sup>3</sup>/año (24%) y la industria usa 430 Mm<sup>3</sup>/año (18%). Para satisfacer éstas demandas se utiliza agua subterránea como la principal fuente de agua, de la cual se extraen 1,960 Mm<sup>3</sup>/año, mientras que otros 440 Mm<sup>3</sup>/año provienen de fuentes alternas conducidas mediante el acueducto de la ciudad.

## Geohidrología

El acuífero está constituido por Limolita, Arenisca y Dolomita de origen mesozoico, con conductividad hidráulica de  $7.9 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , a 32 m de profundidad y piezometría de 3 msnm. La peculiaridad de éste acuífero son las fracturas kársticas de algunos sitios. Éstas permiten el paso del agua de forma más eficiente que en los sitios sin fractura.

## Operación

El efluente de recarga proviene de una planta de tratamiento (Galatone WWTP), que se une al agua superficial de diversas fuentes. Esta agua se envía mediante un canal abierto hacia los dispositivos de recarga, los cuales reinyectan de 12,000 -17,000  $\text{m}^3/\text{d}$  (139 – 196 l/s). Durante un periodo de dos meses durante mayo a septiembre, la recarga se detiene con el fin de darle mantenimiento al sistema. El agua que sale de la PTAR se aprovecha en riego agrícola (Ver Imagen 18).

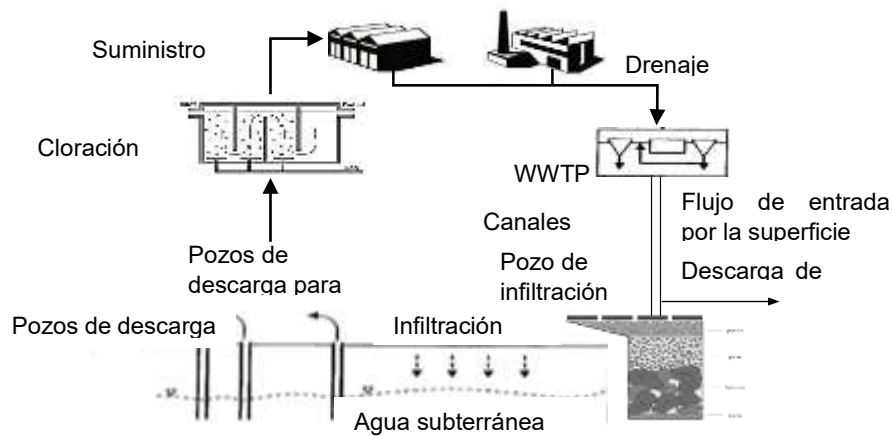


Imagen 18 Esquema de recarga del acuífero de Nardó (Sur de Italia).

#### 4.2.7 Sadabell, España

La Ciudad de Sadabell se localiza a 20.6 km al Norte de Barcelona, tiene una población de 200,000 hab, una extensión territorial de 37.89 km<sup>2</sup> y una precipitación entre 600-700 mm/año. Desde el año 2004, por el aumento en la demanda de alimentos, la extracción del agua del acuífero ha tenido que satisfacer la demanda del sector agrícola además de la demanda de la industria textil de la zona. Cuenta con dos plantas de tratamiento para tratar tanto agua residual como de la industria (principalmente textil).

El agua residual se colecta y se envía a dos grandes secciones ubicadas a lo largo del río Ripoll para subdividir así el agua según su origen y hacer más eficiente su tratamiento: La primera sección llega a la planta de tratamiento (River) y es tratado a nivel secundario. La segunda sección se envía a la planta de tratamiento Ripoll y el agua residual tratada es la que se recarga al acuífero utilizando el Río Ripoll como lecho filtrante.

La planta de tratamiento de aguas residuales Río Ripoll cuenta con una capacidad máxima de 30,000 m<sup>3</sup>/d (347 l/s) y 16,000 m<sup>3</sup>/s (185 l/s) en promedio. El agua es colectada por gravedad, y al llegar a la planta de tratamiento, pasa por un pretratamiento de remoción de sólidos (proceso primario), posteriormente por un tratamiento secundario en el que se remueven nutrientes (N y P) y finalmente, el efluente es descargado en el río Ripoll en tres puntos. El río tiene una longitud de 40 km y se origina en el parque "Sant Lorenz del Mult ilÓbac". El lecho del río está compuesto principalmente por arena y grava, lo que facilita el permeado y la absorción, es por esto que se optó por usar el lecho del río como medio de recarga. Una parte de la recarga que llega al acuífero se infiltra por el lecho del río y la otra parte se pierde por procesos de evapotranspiración. El agua infiltrada se extrae en la mina de Torrella mil, ésta se desinfecta (UV y cloración) y se usa para el riego de árboles en el parque de Taulin en la ribera del río y otra parte se utiliza para la limpieza de calles.

#### *Hidrogeología*

Se trata de un acuífero no confinado, el cual se ha clasificado a partir de las zonas existentes de acuerdo al tipo de sedimentos.

- Acuífero aluvial (de origen cuaternario). Formado por arenas y arcillas y un bajo porcentaje de gravas. La recarga ocurre por infiltraciones del agua del río Ripoll, excedentes de la irrigación y fugas en el sistema. Ubicado en las viejas terrazas (antigua zona de terrazas) del río Ripoll, con alta transmisividad (4551 m<sup>2</sup>/d) y donde se presenta el mayor porcentaje de recarga.

- Acuífero del mioceno (bajo el acuífero aluvial) formado por la deposición de materiales. Formada principalmente por materiales conglomerados.

- Acuífero multiestratificado con diferentes zonas de permeado. La recarga se realiza mediante los acuíferos de aluviones con transmisividad de 5-7 m<sup>2</sup>/día y donde ocurre el menor porcentaje de recarga.

En la mina donde se extrae el agua, la infiltración del agua del río al acuífero aluvial provoca el enriquecimiento del recurso debido a que el nivel del agua subterránea es 7m menor al

nivel del río. Mediante estudios en diferentes pozos se determinó que un gran porcentaje de agua extraída de la mina proviene del Río Ripoll, lo que refleja el éxito del programa de recarga.

*Proceso de Operación de la Planta de Tratamiento de Río Ripoll*

La PTAR río Ripoll cuenta con una capacidad máxima de 30,000 m<sup>3</sup>/d (347 L/s) pero sólo se recibe en promedio entre 15,000 y 16,000 m<sup>3</sup>/d (173 y 185 L/s) cantidad que se reduce durante el verano de los cuales envía 5,000,000 m<sup>3</sup>/anuales (158.5 L/s) al río para recarga por infiltración.

Posterior a su extracción en la mina, el agua desinfectada (mediante UV y Ozono) se almacena en un tanque donde se clora y filtra (filtros de arena). Después del filtrado, el agua se envía a un tanque de almacenamiento para irrigar, mediante un sistema de aspersores, las áreas verdes y mediante riego directo, los árboles de la Riviera (70% del total). Para la limpieza de las calles, se usa el 30% restante del agua que se extrae de la mina.

Se ha encontrado que la recarga artificial promueve la reducción de SS, DBO, DQO, además de que los parámetros de COD, N y P están por debajo del límite de detección, lo cual cumple cabalmente con la regulación (Imagen 19).

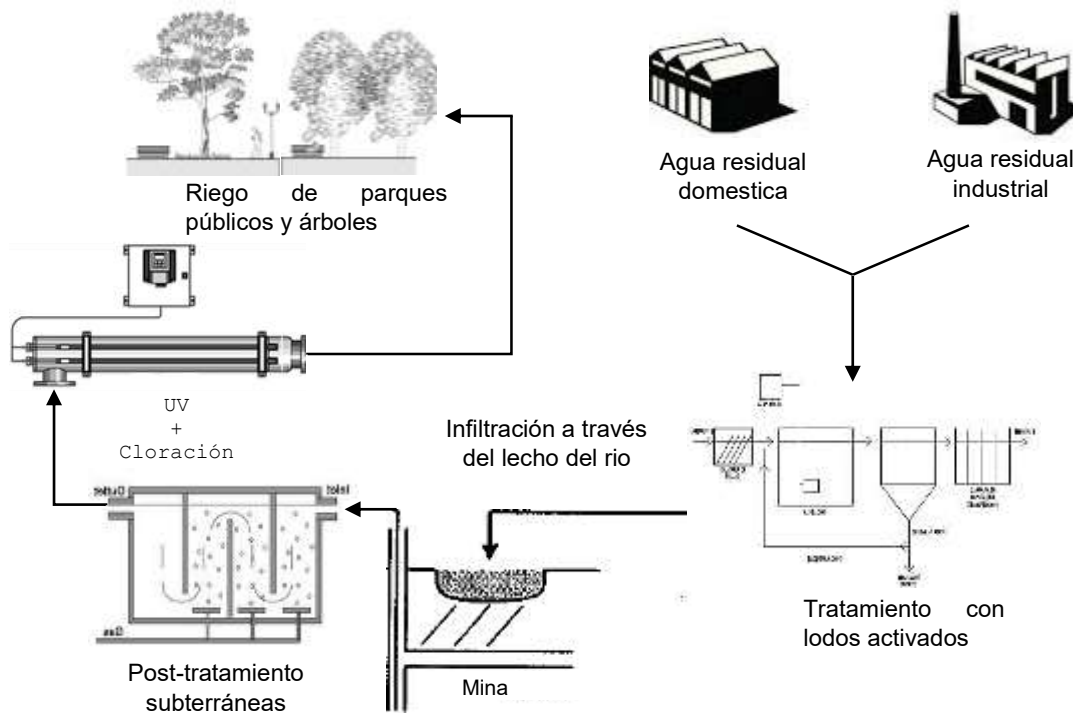


Imagen 19 Esquema de reuso de agua en Sabadell, España.



### *Usos futuros del agua extraída*

Se consideran usos alternativos para el agua extraída de la mina, ya que al ser tan efectivo el programa de reinyección, el agua que éste provee podría ayudar a satisfacer las necesidades actuales y proyectadas de la ciudad, siendo los usos con mayor demanda el industrial, recreativo y potable, como posible alternativa a la falta de agua.

Una de las principales limitantes del proyecto es lograr la implementación de tratamientos post extracción mucho más específicos para asegurar que la calidad requerida para dichas actividades cumpla con la legislación vigente, además de que, actualmente, no se cuenta con la tecnología instalada (por su costo) para realizar estos procesos.

Se han detectado incrementos en el nivel del acuífero en los tres puntos de muestreo de la Catalan Water Agency pero se requieren mayores estudios para conocer la evolución del acuífero y asegurar que la captación y almacenamiento del agua en el acuífero se realice de manera homogénea a lo largo del lecho del río.

### **4.2.8 Planta Torreele, Wulpen Bélgica**

La Intermunicipal Water Company of the Volume Region (IWVA) es responsable de la distribución del agua potable en la parte occidental de Wulpen Bélgica. A principios de la década de 1990 la IWVA ya no podía aumentar la extracción de agua subterránea desde sus zonas de captación de agua de dunas en St-André (123 ha) y el Westhoek (87 ha) para satisfacer la demanda de agua de consumo cada vez mayor (Figura 3.1). En este último, la salinidad aumentó dramáticamente desde el inicio de la década de 1980, por lo que era necesario un nuevo enfoque para la gestión sustentable del agua subterránea. La recarga artificial del acuífero no confinado de la captación de agua de Dunas St-André fue la solución seleccionada. Con ello se pretendía restaurar la calidad del agua subterránea y mejorar los valores ecológicos de las zonas de Dunas reduciendo la extracción de agua subterránea. El efluente de una planta de tratamiento de agua residual fue seleccionado como la fuente para la producción de agua de infiltración.

Desde 1997 hasta 1999 las pruebas piloto se realizaron en el efluente de la planta de tratamiento de agua residual en Wulpen, que es operado por Aquafin. Diferentes sistemas de micro y ultrafiltración se investigaron para el pre-tratamiento (Van Houtte et al. 1998 y 2000) y dos tipos de membranas de ósmosis inversa se ensayaron para la desalinización (Van Houtte y Vanlerberghe, 2001).

La planta Torreele, comenzó operación en julio de 2002, y es un ejemplo de reúso indirecto de agua potable en Europa, utiliza efluente secundario de agua residual para recarga artificial de acuífero en St-Andre, con la recarga aumenta los niveles de agua subterránea y a largo plazo, reduce el riesgo de intrusión de agua de mar. Este acuífero se utiliza para extraer agua potable para las comunidades cercanas y proporciona entre el 40% y 50% de la demanda de agua potable.

### *Cantidad*

En los últimos años la demanda de agua potable en la zona se redujo de 5,5 millones de m<sup>3</sup> en 2002 (15, 070 m<sup>3</sup>/d) a poco menos de 4,9 millones de m<sup>3</sup> en 2010 (13,425 m<sup>3</sup>/d). La educación pública sobre el uso adecuado del agua potable, el aumento de los precios debido a la impuestos más altos para la descarga del agua utilizada, y la disminución de fugas de la red de distribución todos contribuyeron a esta disminución.

### *Calidad*

Como resultado del tratamiento de barrera múltiple, la calidad del agua potable ha mejorado significativamente en términos de dureza y color. El agua producida constantemente ha sido de excelente calidad. La Recarga de acuíferos con agua residual altamente tratada ha aumentado la calidad final del agua potable de los años. La conductividad del agua extraída gradualmente ha disminuido en un 60 por ciento y la disminución se ha observado en la concentración orgánica del contenido, hierro y manganeso.

### *Tecnología de tratamiento del agua*

Basándose en la experiencia del Condado de Orange (EE.UU.), donde efluente secundario clarificado fue tratado por inyección de agua subterránea como una barrera contra la intrusión de agua salina y donde se llevaron a cabo nuevas pruebas piloto (Leslie et al. 1996), una combinación de técnicas de filtración de membrana fue elegido como tratamiento avanzado de agua tras el tratamiento de aguas residuales para producir el agua de infiltración:

- ❖ La ultrafiltración (UF) como la primera etapa de tratamiento para eliminar los sólidos suspendidos y las bacterias del efluente y
- ❖ La ósmosis inversa (RO) como el tratamiento final, no sólo la eliminación de sales, nutrientes y los virus, sino también pequeñas orgánicos (por ejemplo, pesticidas), compuestos disruptores endocrinos y productos farmacéuticos (Ver imagen 20).

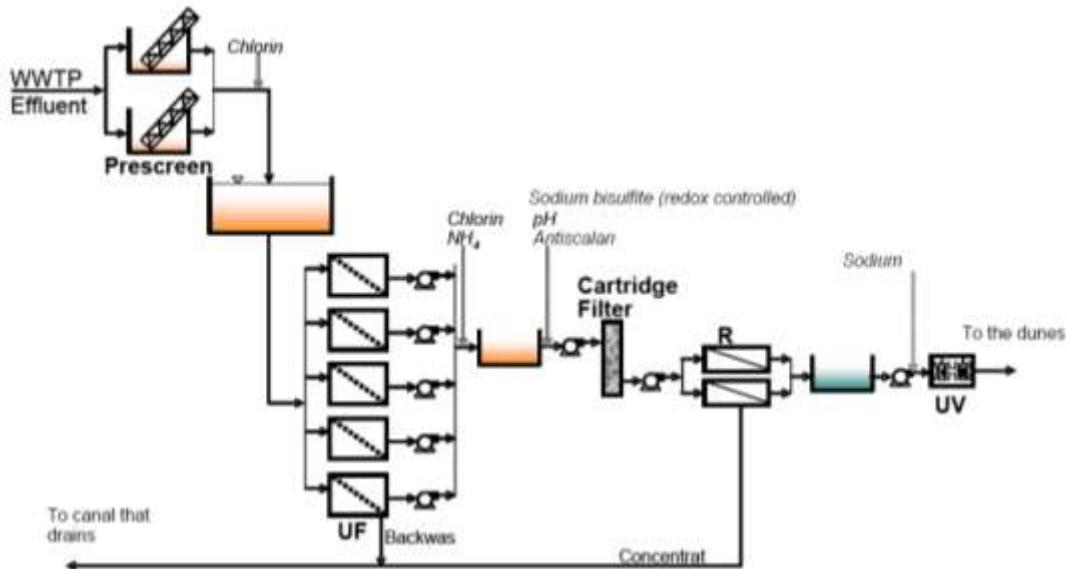


Imagen 20 Esquema de proceso de la planta de regeneración de agua Torreale.  
Fuente: Van Houtte y Verbauwheide, 2008.

De los ocho casos de estudio documentados anteriormente, los principales objetivos en común son la inyección e infiltración de agua residual renovada para poder atenuar problemas como: disminución del nivel del manto freático, intrusión marina, suministro de agua potable y dotación de agua a los depósitos y embalses.

En todos los casos se emplean sistema de múltiples barreras a base de nanotecnología (aunque difieren del tipo de membranas). Cada proyecto posee características diferentes tales como: caudal de tratamiento, clima de la región, concentraciones iniciales del influente, concentraciones finales del efluente, tipo de uso (calidad con base a normatividad) y factores económicos. Cabe destacar que en todo proyecto de reuso indirecto, una planta piloto ha sido utilizada para evaluar la eficiencia de los componentes de la planta.

Para que el agua renovada cumpla con estándares de calidad y que supere los límites máximos establecidos en normas, es necesario que el agua residual proveniente de una planta de proceso secundario se someta a procesos de tratamiento avanzado. Este tratamiento avanzado es efectuado mediante procesos de membrana (Nanofiltración, Ultrafiltración, Microfiltración y Ósmosis inversa), para asegurar la eliminación de compuestos orgánicos, microorganismos, remoción de sales, minerales y partículas muy pequeñas, por otro lado, la desinfección se efectúa mediante procesos de luz ultravioleta con peróxido de hidrogeno, con ello se destruye la materia orgánica de estructura compleja que no se puede eliminar con otras tecnologías.

Finalmente, el éxito de estos casos de estudio se debe a que implementaron estrategias tales como: realizar estudios geohidrológicos, los proyectos parten de un efluente secundario para acoplar posteriormente un sistema de múltiples barreras, operar plantas piloto por al menos dos años para evaluar la eficiencia del tren de tratamiento, realizar monitoreo constante en la calidad del efluente y estudios de percepción social.

### 4.3 TECNOLOGÍA DEL TRATAMIENTO PARA REÚSO INDIRECTO

Es inevitable que el agua renovada será una fuente de suministro de agua potable en el futuro. La tecnología disponible es muy variada pero en todos los casos se requiere de múltiples barreras que involucran diferentes etapas del proceso de potabilización, entre las que se destaca: un tratamiento preliminar para la retención y eliminación de arenas; un tratamiento primario en el cual se reducen los sólidos; un tratamiento secundario para favorecer la remoción de los constituyentes orgánicos biodegradables, turbiedad, SST y posible eliminación de nutrientes y un tratamiento avanzado, que evoluciona constantemente, pero que debe garantizar la remoción de moléculas muy pequeñas como los contaminantes emergentes, sales, minerales así como organismo patógenos entéricos, como los virus, y organismos indicadores. En este capítulo se centra principalmente en los procesos de tratamiento avanzado utilizados para cumplir con los objetivos de calidad de agua de reúso indirecto o directo.

El *tratamiento avanzado* (Ver imagen21) del agua residual se define como el tratamiento adicional necesario para la eliminación de la materia orgánica suspendida o disuelta que permanecen en el agua residual después del tratamiento secundario convencional. Estas sustancias puede ser de naturaleza diversas ya sea como iones inorgánicos relativamente simples, como el calcio, el potasio, el sulfato, el nitrato, y el fósforo, hasta un número cada vez mayor de compuestos orgánicos sintéticos muy complejos (Metcalf & Eddy, 2003).

Diversos procesos pueden combinarse para producir la calidad del agua efluente deseado dependiendo de los requisitos de reutilización, calidad del agua de la fuente, consideraciones de eliminación de residuos, costo de tratamiento y necesidades energéticas.



Imagen 21 Diagrama de tratamiento mediante barreras múltiples para reúso indirecto. Fuente: Chávez et al., 2015.

### 4.3.1 Procesos de barreras múltiples sugeridos por la normatividad nacional para la potabilización de agua residual tratada

La norma actual de agua potable (NOM 127 SSA1/1997) no se establecen los procesos de potabilización que puede uno emplear con el fin de garantizar la calidad del agua potable, sin embargo y con base en una revisión realizada, ya se cuenta con un proyecto de Norma Oficial Mexicana (PROY NOM-250 SSA1-2014, Agua para uso y consumo humano), que en un futuro podrá sustituir la norma vigente, motivo por el cual fue considerada en la tesis.

Dicha norma considera criterios de potabilización mediante el uso de barreras múltiples. Al mismo tiempo establecen guías con posibles procesos para la potabilización basadas en el grupo de parámetros que requiere removerse, haciendo énfasis en estos procesos pueden variar de acuerdo con los resultados de las diversas pruebas de tratabilidad que deban hacerse en cada caso.

Los procesos de barreras múltiples se basan en la idea que si un solo proceso natural o tecnológico de eliminación se vuelve eficaz, la contaminación química se evitará por otros procesos posteriores. Debido a la dificultad de asegurar la calidad de agua renovada, y en vista de la gama y diversidad de compuestos, un enfoque de barreras múltiples se ha utilizado para proporcionar el nivel deseado de seguridad (Toze, 2006). Hoy en día, este concepto consiste en el diseño de los esquemas de tratamiento, la combinación de los procesos y mecanismos que actúan a través de diferentes vías de diseminación de contaminantes para removerlos o neutralizarlos repetidamente por varios pasos. Esto asegura que si un proceso falla la otra medida complementará la tarea.

Con base en los valores establecidos en la normatividad, se elaboró la tabla 10 en donde presenta a manera de resumen, el tipo de proceso de tratamiento vs el parámetro involucrado, de esta manera se establece que, para los parámetros físicos como el pH, el método de neutralización es el mayormente sugerido, mientras que para el parámetro de la turbiedad existe una amplia gama de métodos como la filtración, coagulación y los sistemas de membrana como microfiltración, ultrafiltración y ósmosis inversa.

En cuanto a la remoción los otros tipos de constituyentes presentes en el agua, los procesos que mayormente se sugiere emplear son los sistemas de membranas tales como: ósmosis inversa, nanofiltración, ultrafiltración y microfiltración.

Parámetros	Físicos	Inorgánicos					Microorganismos			Metales y Metaloides														Subproductos de Desinfección							Compuestos orgánicos									
																								Trihalometanos			Ácidos haloacéticos totales			Aniones			Formaldehído	1	2	3	4			
Tratamiento propuesto	pH	Turbiedad	Cianuros Totales	Dureza Total	Fluoruros	Nitrógeno como Nitratos	Nitrógeno como Nitritos	****Bacterias	Quistes de protozoarios (Giardia lamblia)	Microcistina -LR	Arsénico	Antimonio	Bario	Cadmio	Cobre	Cromo	Mercurio	Níquel	Plomo	Selenio	Bromodichlorometano	Bromoformo	Cloroformo	Dibromoclorometano	Ácido tricloroacético	Ácido dicloroacético	Ácido cloroacético	* Bromatos	** Cloratos	***Cloritos										
Ablandamiento Químico				✓	✓																																			
Ablandamiento y precipitación con cal												✓	✓	✓	✓		✓	✓																						
Adsorción con óxidos de hierro												✓																												
Adsorción en alúmina activada					✓							✓									✓																			
Adsorción en carbón activado granular										✓							✓				✓	✓	✓	✓											✓					
Adsorción en carbón de hueso					✓					✓																														
Adsorción sobre óxidos de hierro granular o arenas cubiertas con óxidos de hierro												✓																												
Arrastre con aire																																					✓	✓		
Coagulación-floculación-sedimentación-filtración		✓	✓		✓			✓	✓	✓	✓				✓	✓	✓	✓			✓				✓	✓	✓													
Coagulación-precipitación-filtración												✓																												
Desinfección con cloro								✓																																
Desinfección con compuestos de cloro								✓		✓																														
Desinfección con ozono								✓		✓											✓	✓	✓	✓																

Parámetros	Físicos		Inorgánicos				Microorganismos			Metales y Metaloides														Subproductos de Desinfección						Compuestos orgánicos								
	pH	Turbiedad	Cianuros Totales	Dureza Total	Fluoruros	Nitrógeno como Nitratos	Nitrógeno como Nitritos	****Bacterias	Quistes de protozoarios (Giardia lamblia)	Microcistina -LR	Arsénico	Antimonio	Bario	Cadmio	Cobre	Cromo	Mercurio	Niquel	Plomo	Selenio	Trihalometanos				Ácidos haloacéticos totales			Aniones			Formaldehído	1	2	3	4			
																					Bromodlorometano	Bromoformo	Cloroformo	Dibromoclorometano	Ácido tricloroacético	Ácido dicloroacético	Ácido cloroacético	* Bromatos	** Cloratos	***Cloritos								
Desinfección con UV							✓																															
Desinfección con yodo o plata iónica							✓																															
Desorción con aire																						✓	✓	✓	✓													
Electrodialísis				✓	✓	✓	✓				✓	✓	✓			✓	✓	✓	✓	✓	✓																	
Extracción selectiva con resinas de intercambio aniónico en medio básico							✓							✓			✓																					
Filtración en múltiples etapas							✓			✓																												
Filtración lenta		✓						✓	✓																													
Intercambio aniónico																																						
Intercambio catiónico														✓	✓	✓	✓																					
Intercambio iónico				✓		✓	✓				✓																											
Microfiltración		✓						✓													✓																	
Microfloculación con ozono		✓																																				
Nanofiltración				✓				✓	✓	✓											✓																	
Neutralización		✓																																				
Ósmosis inversa		✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓				✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓																	
Oxidación química			✓			✓	✓																															

Parámetros	Físicos	Inorgánicos					Microorganismos			Metales y Metaloides														Subproductos de Desinfección						Compuestos orgánicos							
																								Trihalometanos			Ácidos haloacéticos totales			Aniones			Formaldehído	1	2	3	4
Tratamiento propuesto	pH	Turbiedad	Cianuros Totales	Dureza Total	Fluoruros	Nitrógeno como Nitratos	Nitrógeno como Nitritos	****Bacterias	Quistes de protozoarios (Giardia lamblia)	Microcistina -LR	Arsénico	Antimonio	Bario	Cadmio	Cobre	Cromo	Mercurio	Niquel	Plomo	Selenio	Bromodlorometano	Bromoformo	Cloroformo	Dibromoclorometano	Ácido tricloroacético	Ácido dicloroacético	Ácido cloroacético	* Bromatos	** Cloratos	***Cloritos	Formaldehído	1	2	3	4		
Ozonización						<	<		<																							<	<	<	<	<	
Ozonización y filtración biológicamente activa																									<	<	<										
Tratamiento biológico (desnitrificación)								<																													
Ultrafiltración	<							<																													
Ultrafiltración seguida de desinfección																																					<

Tabla 10 Procesos de tratamiento que remueven los diversos tipos de contaminantes existentes en el agua residual, adaptado del proyecto de la NOM 250 SSA1-2014.

Una vez que se forman es difícil removerlos. La prevención se basa en el control apropiado de las condiciones de desinfección. Cuando en la fuente hay bromuros, se previene la formación con la presencia de amonio a pH 9.

\*\*No hay tratamiento. Puede evitarse o controlarse su formación mediante prácticas del control de la dosis de dióxido de cloro o la adición del anión cuando se aplica hipoclorito de sodio.

\*\*\* Aplicación de sales ferrosas.

\*\*\*\*(E. coli, coliformes fecales, organismos termotolerantes y enterobacterias patógenas)

1 -Compuestos orgánicos halogenados adsorbibles fijos.

2 -Compuestos orgánicos no halogenados.

3 -Compuestos orgánicos halogenados adsorbibles purgables.

4 -Carbono Orgánico Purgable.



## 4.3.2 Descripción de las barreras múltiples sugeridas en el proyecto de norma NOM 250 SSA1-2014

### 4.3.2.1 Filtración Granular

La filtración del agua residual se suele llevar a cabo para eliminar los flóculos biológicos residuales presentes en efluentes sedimentados de tratamientos secundarios antes del vertido a los cuerpos de agua receptores. La filtración, también se emplea para la eliminación de precipitados residuales procedentes de la precipitación de fosfatos con sales metálicas o con cal, y se utilizan como operación de pretratamiento antes de la alimentación del agua residual tratada a las columnas de carbón activado (Metcalf & Eddy, 2003).

La filtración implica el paso del agua residual a través de un lecho de medios granulares, que retienen los sólidos. Los medios típicos incluyen arena y antracita. Las eficiencias de remoción se pueden mejorar a través de la adición de ciertos polímeros y coagulantes. Los filtros de agua residual reciben partículas de tamaño mayor y más variable, mayor peso, y cargas de sólidos más variables. Los mecanismos de filtración son complejos, y pueden resultar de la combinación de diversos factores, entre los que incluyen el arrastre (mecánico o por colisión aleatoria), la intercepción dentro del medio filtrante, la sedimentación por gravedad, impacto inercial de las partículas que presentan adhesión al medio filtrante, y el crecimiento de sólidos biológicos en el seno del medio, lo cual favorece, adicionalmente, la eliminación de sólidos (Metcalf & Eddy, 2003).

### 4.3.2.2 Filtración mediante membranas

Los procesos de membrana pueden utilizarse para la eliminación de partículas finas, como aquella que produce la turbiedad, así como para eliminar los Trihalometanos (THM), precursores orgánicos específicos o para la desinfección. Los cinco procesos de membrana con el mayor potencial para aplicaciones del agua residual son la ósmosis inversa, nanofiltración, ultrafiltración, microfiltración y electrodiálisis.

#### ❖ *Microfiltración*

La microfiltración es un proceso de separación que utiliza fibras huecas de polipropileno, con pequeños poros en los lados de aproximadamente 0,2 micras de diámetro. Para obtener agua a través de los poros en el centro de las fibras, sólidos en suspensión, protozoos, bacterias y algunos virus se filtran fuera del agua (Groundwater Replenishment System, 2015). Las membranas de microfiltración separan partículas que tienen un tamaño de entre 0.1  $\mu\text{m}$  y 100  $\mu\text{m}$  (baterías, polvo de carbón muy fino, amianto, etc.) (imagen 22) Estas membranas pueden ser de nylon, polietileno, polipropileno, etc.

#### ❖ *Ultrafiltración*

Los sistemas de ultrafiltración son operaciones que emplean membranas porosas para la eliminación de materia disuelta y coloidal. Las membranas de ultrafiltración retienen el paso de partículas con un tamaño de entre 0.0045  $\mu\text{m}$  y 100  $\mu\text{m}$  (0,1 mm) (imagen 23), se suele emplear para eliminar materia coloidal y moléculas de gran tamaño. Las aplicaciones de la

ultrafiltración incluyen la eliminación de aceites de cursos de agua, y la eliminación de la turbidez provocada por los coloides causantes de color (Metcalf & Eddy, 2003).

#### ❖ *Nanofiltración*

Mientras que con la microfiltración y la ultrafiltración se separan partículas en suspensión del líquido, mediante la nanofiltración se pueden separar moléculas disueltas en el líquido (azúcares, proteínas, moléculas de colorante, etc.). Las membranas de nanofiltración tienen un diámetro de poro de entre 0.001  $\mu\text{m}$  y 100  $\mu\text{m}$  (imagen 23) tamaño típico de la mayoría de moléculas que no tienen un peso molecular elevado. Incluso quedan retenidos iones como el  $\text{Ca}^{2+}$  y el  $\text{Mg}^{2+}$ , hecho que hace posible utilizar estas membranas para eliminar la dureza del agua, sin haber de dosificar reactivos químicos.

#### ❖ *Ósmosis inversa*

La ósmosis inversa es un proceso en el que se separa el agua de las sales disueltas en disolución mediante la filtración a través de una membrana semipermeable a una presión superior a la presión osmótica provocada por las sales disueltas en el agua residual.

#### ❖ *Electrodialisis*

En el proceso de electrodialisis los componentes iónicos de una solución se separan mediante el uso de membranas semipermeables selectivas de iones. La aplicación de un potencial eléctrico entre los dos electrodos origina una corriente eléctrica que atraviesa la solución, la cual, a su vez, da lugar a una migración de cationes hacia el electrodo negativo y de aniones hacia el electrodo positivo. Dada la disposición alternada de las membranas permeables a los cationes y aniones, se forman células de sales concentradas y diluidas. El agua residual se bombea a través de las membranas que están separadas por unos espaciadores y dispuestos en pilas. El agua residual se retiene, generalmente, durante 10 a 20 segundos aproximadamente en cada pila individual o etapa. La eliminación de sólidos disueltos varía con: (1) la temperatura del agua residual; (2) la corriente eléctrica que se hace circular; (3) el tipo y cantidad de iones; (4) la selectividad de la membrana; (5) el potencial de producir incrustaciones de agua residual; (6) los caudales de agua residual, y (7) el número y configuración de etapas (Metcalf & Eddy, 2003).

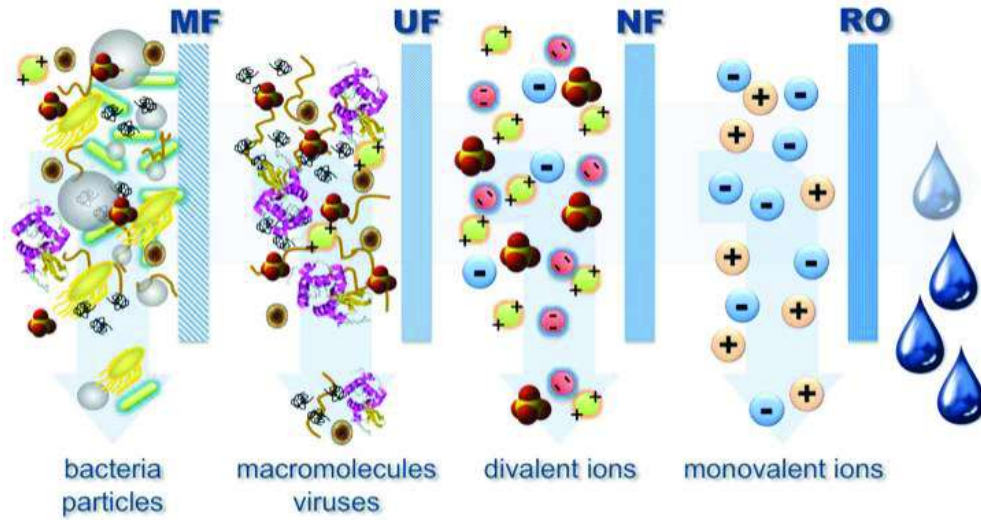


Imagen 22 Membranas utilizadas para la potabilización (microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa).

Fuente: Committee on the Assessment of Water Reuse as an Approach to Meeting Future Water Supply Needs, Water Science and Technology Board, Division on Earth and Life Studies, National Research Council, 2012.

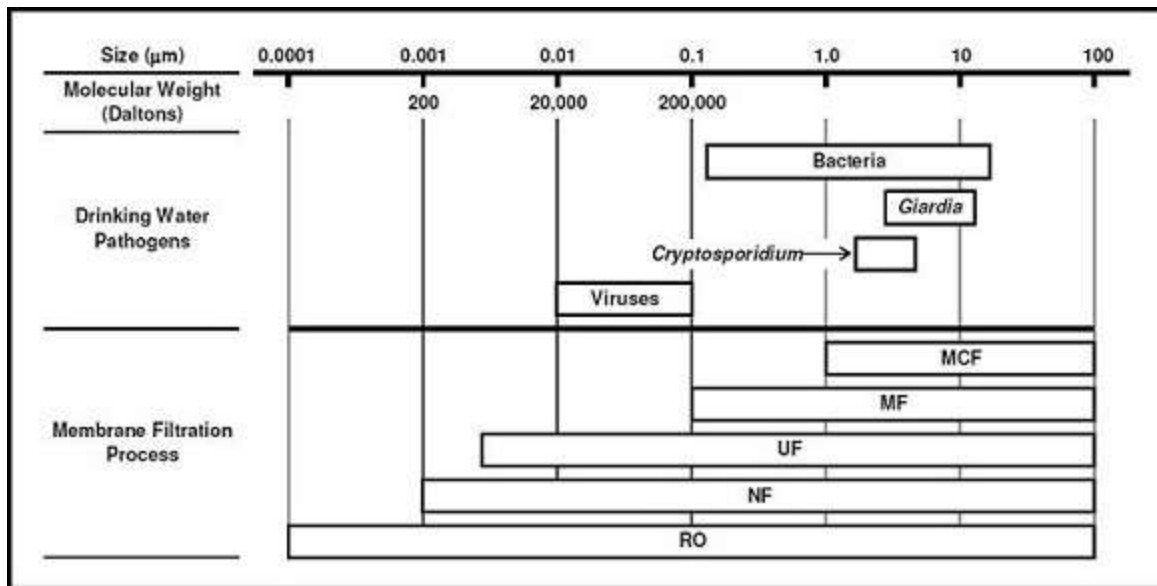


Imagen 23 Intervalos de aplicación de los procesos de membrana.

Fuente: USEPA, 2005.

#### **4.3.2.3 Adsorción en carbón activado**

##### **❖ Carbón activado**

En regeneración de agua, los procesos de adsorción se utilizan a veces para quitar los componentes disueltos por la acumulación de una fase sólida. El carbón activado es un adsorbente común, que se emplea como carbón activado en polvo (*powdered activated carbon*, PAC, por sus siglas en inglés) con un diámetro de grano menor de 0,074 mm o carbón activado granular (*granular activated carbon*, GAC, por sus siglas en inglés), que tiene un diámetro de partícula mayor de 0,1 mm. Durante el tratamiento de agua, el PAC puede añadirse directamente al proceso de lodos activados o el proceso de contacto con sólidos, aguas arriba de un paso de filtración terciaria. El GAC se utiliza en la filtración de presión y gravedad. El carbón activado es eficiente para la eliminación de muchos compuestos orgánicos sintéticos regulados así como para la localización de productos químicos orgánicos presenta propiedades de alta y moderada hidrofobicidad (por ejemplo, las hormonas esteroideas, triclosán, bisfenol A) (Snyder et al., 2006a).

#### **4.3.2.4 Desinfección**

Los procesos de desinfección son aquellos que están deliberadamente diseñados para la reducción de patógenos. Generalmente destinados a la reducción de patógenos como las bacterias (*Salmonella*, *Shigella*), virus (norovirus, adenovirus) y protozoos (*Giardia*, *Cryptosporidium*). Los agentes comúnmente utilizados para la desinfección en el tratamiento de agua residual son el cloro (aplicado como cloro gaseoso o hipoclorito líquido) y la irradiación ultravioleta (UV). El cloro sólo se adquiere como producto químico en el comercio. El dióxido de cloro, ozono y UV son generados in situ. Las cloraminas se forman de cloro o de hipoclorito si están presentes en cantidades adecuadas de amoníaco (como en el agua residual) o si deliberadamente se agrega amoníaco (Asano et al., 2007) los desinfectantes más empleados se describen a continuación.

##### **❖ Cloro**

La eficiencia de la desinfección con cloro depende de la temperatura del agua, pH, grado de mezcla, tiempo de contacto, la presencia de sustancias que interfieren, la concentración y la forma de cloración, y la naturaleza y concentración de los organismos para ser destruidos. En general, las bacterias son menos resistentes al cloro que son los virus, que a su vez son menos resistentes que los quistes. La dosificación de cloro necesario para desinfectar un agua residual a cualquier nivel deseado está fuertemente influenciado por los constituyentes presentes en el agua residual. En la práctica, la cantidad de cloro añadido se determina empíricamente, basado en la calidad y el efluente residual deseado. El cloro, que en bajas concentraciones es tóxico para muchos organismos acuáticos, se controla fácilmente en el agua residual por decloración, típicamente con dióxido de azufre o tiosulfato. El cloro tiene la desventaja de que debe ser manejado con cuidado y las precauciones de seguridad necesarias pueden ser costoso. El efluente secundario se puede desinfectar con cloro para lograr niveles muy bajos de bacterias coliformes, aunque es poco probable que se produzca la completa destrucción de bacterias y virus patógenos.

La cloración del efluente secundario que ha recibido un tratamiento adicional para eliminar toda materia suspendida puede producir agua residual que está esencialmente libre de bacterias y virus. El cloro, a las concentraciones normales utilizados en el tratamiento de aguas residuales, no puede destruir los huevos de helmintos, *Giardia lamblia* y especies de *Cryptosporidium* (Committee on the Assessment of Water Reuse as an Approach to Meeting Future Water Supply Needs, Water Science and Technology Board, Division on Earth and Life Studies, National Research Council, 2012).

#### ❖ *Ozono*

El ozono es un agente desinfectante potente y un potente oxidante químico en ambas reacciones inorgánico y orgánico. Debido a la inestabilidad de la capa de ozono, que debe ser generada en el sitio del gas portador de aire u oxígeno. El ozono destruye bacterias y virus por medio de la rápida oxidación de la masa de proteína, y la desinfección se logra en cuestión de minutos. Algunas desventajas son que el uso de ozono es relativamente caro y consume mucha energía, los sistemas de ozono son más complejos de operar y mantener que los sistemas de cloro, y el ozono no mantiene residuos en el agua. El ozono es un desinfectante muy eficaz para el tratamiento avanzado de agua residual, y se elimina el color y contribuye al oxígeno disuelto. También descompone compuestos orgánicos recalcitrantes en compuestos más biodegradables, lo cual es ventajoso para la recarga de las aguas subterráneas y el tratamiento del suelo-acuífero (Committee on the Assessment of Water Reuse as an Approach to Meeting Future Water Supply Needs, Water Science and Technology Board, Division on Earth and Life Studies, National Research Council, 2012).

#### ❖ *Radiación ultravioleta*

La irradiación del agua residual con radiación ultravioleta para la desinfección es potencialmente una alternativa deseable a la desinfección química, debido a su poder para inactivar bacterias y virus, costo asequible, y la ausencia de desinfección química subproductos. En la exposición de microorganismos con la cantidad correspondiente de la radiación electromagnética (EM) altera las células, el material genético e interfiere con el proceso de reproducción. Algunas bacterias tienen sistemas de enzimas de reparación que son activadas por las energías electromagnéticas similares, y por lo tanto el agua desinfectada puede ser repoblada por estas bacterias particulares después de la desinfección cuando se expone a la luz. La desinfección UV para agua potable y agua residual es la más nueva de las tecnologías de desinfección y aplicaciones (Committee on the Assessment of Water Reuse as an Approach to Meeting Future Water Supply Needs, Water Science and Technology Board, Division on Earth and Life Studies, National Research Council, 2012).

#### 4.4 ZONAS POTENCIALES PARA INTEGRARSE A UN PLAN DE REÚSO POTABLE INDIRECTO

En el año 2015, el grupo de trabajo del Instituto de ingeniería (Chávez et al., 2015) realizaron un proyecto para la Comisión Nacional del Agua donde se identificaron diversas zonas potenciales para el reúso potable indirecto, las consideraciones para la evaluación fueron las siguientes:

- Población mayor a 1 millón de habitantes al año 2030
- Zonas Metropolitanas
- Grado de presión del recurso
- Existencia del acuíferos sobreexplotado
- Tamaño de plantas de tratamiento mayor a 1 m<sup>3</sup>/s,
- volúmenes de agua comprometidos para otros usos como el agrícola, en cuyo caso debe valorarse la factibilidad de intercambiar agua de primer uso por agua residual tratada
- Tratamiento del agua a nivel secundario
- Eficiencia de tratamiento

Los resultados de dicha evaluación fueron retomados y utilizados para proponer las alternativas para aprovechamiento del agua renovada.

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1 ANÁLISIS DE LAS TECNOLOGÍAS

#### 5.1.1 Tecnología utilizadas para recarga de agua al acuífero

A lo largo de esta evaluación, se evidencia que las tecnologías empleadas para la potabilización de agua renovada es muy amplia y variada y que con la experiencia adquirida en cada uno de los procesos es posible obtener una calidad adecuada. Dicha tecnología ha sido mejorada por más de 40 años y que con base en los estudios de caso, los diagramas de flujo de procesos de tratamiento y tecnologías de tratamiento disponibles aceptadas por diversas autoridades reguladoras, su implementación, en la mayoría de los casos, ha sido aceptada por el público.

##### 5.1.1.1 Esquemas de los procesos empleados en los casos de estudio

A continuación, en los siguientes esquemas se sintetiza la aplicación de casos de estudio que ejemplifican las bondades de los sistemas bajo el esquema de barreras múltiples partiendo de un efluente secundario y que pueden servir como base para la implementación de proyectos afines en México.

*Caso 1: Groundwater replenishment system en EE. UU.*

El sistema de barreras múltiples que se emplea en esta planta es mediante procesos de membrana tales como microfiltración y ósmosis inversa (ver imagen 24), en cuanto a la desinfección se emplea radiación ultravioleta con adición de peróxido de hidrógeno. El caudal de tratamiento es de 379,000 m<sup>3</sup>/d.

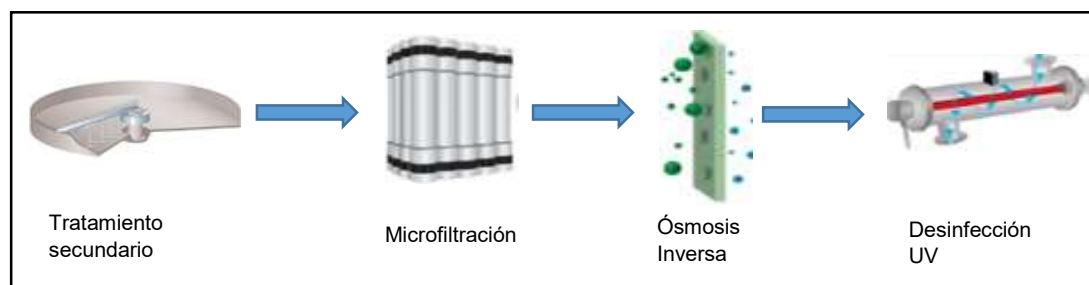


Imagen 24 Esquema de la planta Groundwater replenishment system en California.

*Caso 2: El Paso, Texas: el primero de EE.UU.*

En la planta localizada en El paso Texas, se emplea el siguiente sistema de barreras múltiples: dos trenes de tratamiento de 0.2 m<sup>3</sup>/s, que incluyen un sedimentador primario, un sistema de dos fases de carbón activado en polvo, tratamiento con cal, filtros de arena, desinfección con ozono, y carbon granular activado (ver imagen 25). Con este sistema es posible dar tratamiento a 17,280 m<sup>3</sup>/d.

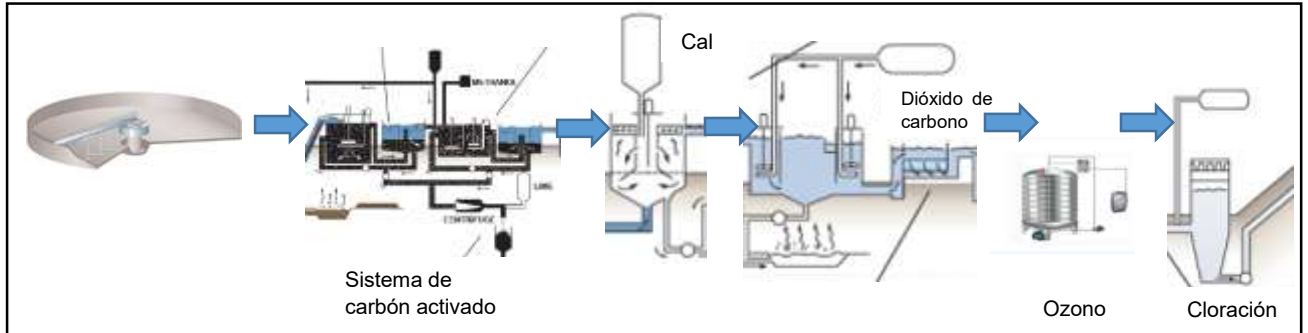


Imagen 25 Esquema de la planta Fred Hervey en El Paso, Texas.

### Caso 3: West Basin Municipal Water District en California

La planta West Basin es un caso de estudio relevante ya que produce cinco diferentes tipos de efluentes (agua terciaria, agua nitrificada, agua ablandada de ósmosis inversa, ósmosis inversa pura y ósmosis inversa ultra-pura), con un caudal de tratamiento de 151, 600 m<sup>3</sup>/d. El sistema de barreras múltiples que se emplea es a base de membranas avanzadas de tratamiento como: microfiltración, ósmosis inversa y la desinfección con radiación ultravioleta (ver imagen 26).

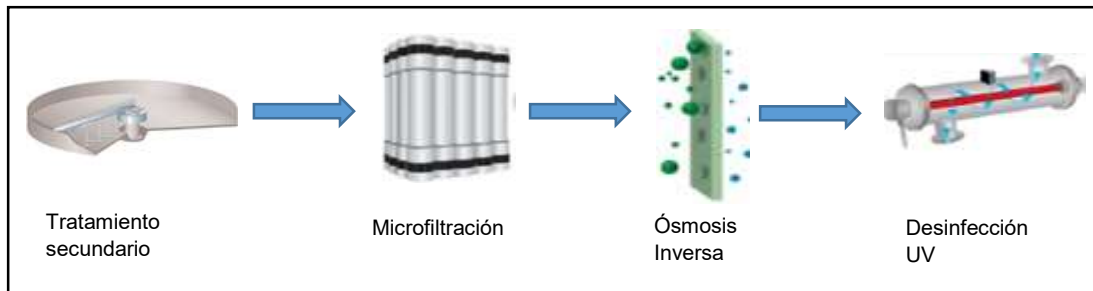


Imagen 26 Esquema de la planta West Basin Municipal Water District en California.

### Caso 4: Windhoek, Namibia: integración de la recarga artificial en la gestión de los recursos hídricos

El caso de estudio de Namibia es bastante interesante ya que el efluente de esta planta es utilizado para reuso directo, es decir, el efluente es enviado directamente al sistema de distribución de agua potable, y también es utilizado para el proyecto de recarga de agua al acuífero (ver imagen 27). El tren de tratamiento que se presenta en esta planta es a base de ozono, tratamiento biológico en carbón activado, ultrafiltración y finalmente una desinfección, es posible dar tratamiento a 23,647 m<sup>3</sup>/d.



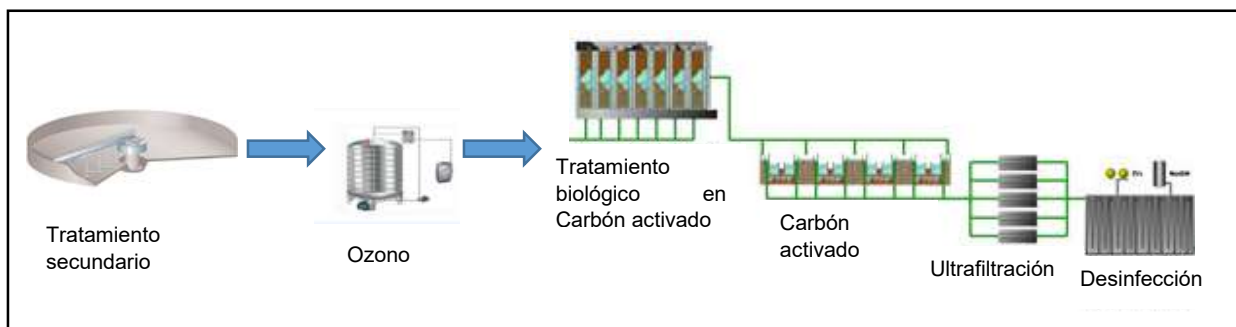


Imagen 27 Esquema de la planta GOREANGAB en Windhoek, Namibia.

**Caso 7: Sadabell, España: Recarga artificial del acuífero con agua tratada**

El principal objetivo de la planta de tratamiento Ripoll es la recarga utilizando el río Ripoll como lecho filtrante. El tren de tratamiento de esta planta parte de un efluente secundario, posteriormente es enviado al río a través de un lecho filtrante, recibe un post-tratamiento y una desinfección UV, más una cloración (ver imagen 28). La capacidad máxima de tratamiento es de 15,000 y 16,000 m<sup>3</sup>/d.

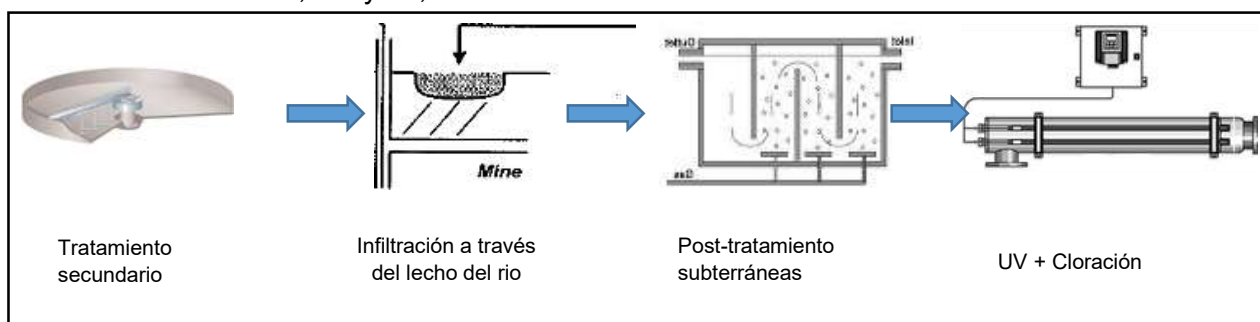


Imagen 28 Esquema de la planta localizada en Sadabell, España.

**Caso 8: Planta Torreele, Wulpen Bélgica**

Como parte de la gestión de agua subterránea en Wulpe Bélgica, se realiza la recarga de agua al acuífero, utilizando agua residual tratada. Es sistema de barreras múltiples que conforma esta planta parte de un tratamiento secundario, posteriormente se emplea tratamiento por membranas (ultrafiltración) y ósmosis inversa, para la desinfección se emplea radiación UV (ver imagen 29). La capacidad de tratamiento es de 13, 425 m<sup>3</sup>/d en el 2010.

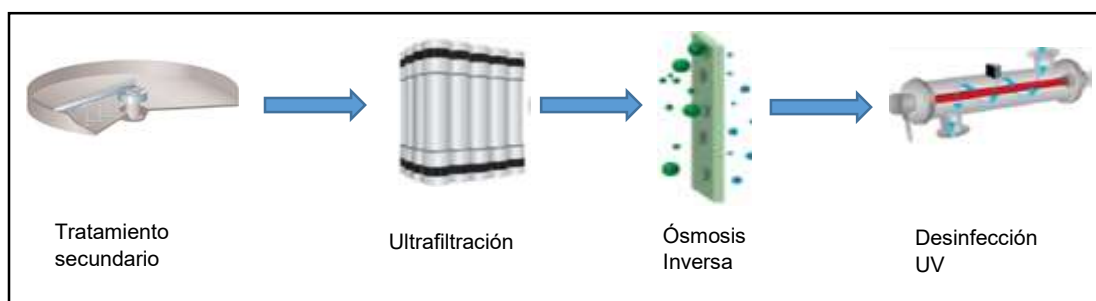


Imagen 29 Esquema de la planta Torreele en Wulpen Bélgica.

### 5.1.2 Eficiencia de remoción de diversos grupos de parámetros y de acuerdo al proceso utilizado en los casos de estudio evaluados

A continuación se describe los procesos de tratamiento que se emplean con base en el parámetro de interés que se desea remover.

Con base en el análisis de las barreras múltiples que se utilizan en los ocho casos de estudio, los procesos mayormente empleados para la remoción de parámetros inorgánicos (cianuros totales, dureza total, fluoruros, nitratos, nitritos, etc) son la ósmosis inversa y ozonización como se observa en la imagen 30.

La **ósmosis inversa (RO)** se emplea principalmente como un proceso de tratamiento de agua residual para eliminar sólidos suspendidos y disueltos (incluyendo microorganismos), ya sea orgánico o inorgánico.

Por otro lado, el **ozono** es un agente desinfectante y un potente oxidante químico en reacciones inorgánicas y orgánicas. El ozono es reactivo frente a la reducción de las moléculas de carbono orgánico en el agua. El ozono descompone compuestos orgánicos recalcitrantes en compuestos más biodegradables, lo cual es ventajoso para la recarga del agua subterránea y el tratamiento del suelo-acuífero (National Research Council, 1994).

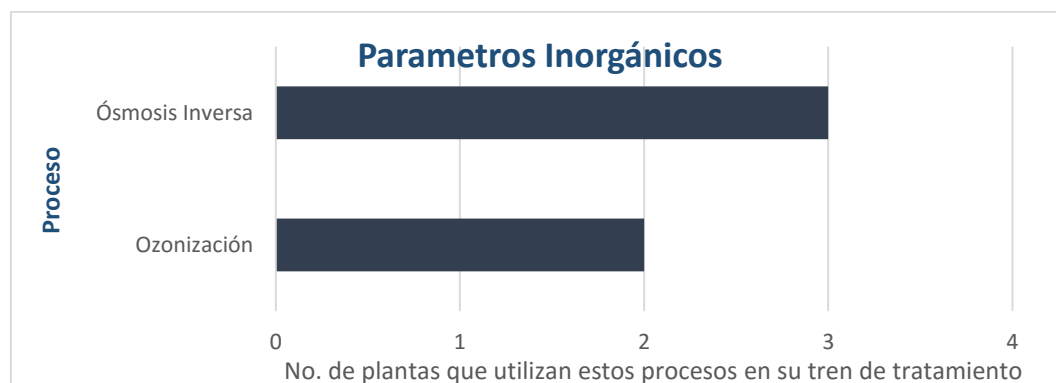


Imagen 30 Procesos empleados para la remoción de parámetros inorgánicos.

Para el caso del grupo de microorganismos (coliformes fecales, *E. coli*, u organismos termotolerantes, *Giardia lamblia*, *Cryptosporidium*, Virus entéricos, Quistes de protozoarios etc.), se emplea una amplia gama de procesos como: radiación ultravioleta, filtros de membrana (ósmosis inversa, microfiltración y ultrafiltración), desinfección con cloro u ozono, etc. (Ver imagen 31).

La irradiación del agua residual con **radiación ultravioleta** para la desinfección es potencialmente una alternativa deseable para la desinfección química, debido a su poder de inactivación para las bacterias y los virus, costo asequible, y la ausencia de desinfección química de subproductos. La exposición de los microorganismos a la cantidad apropiada de radiación electromagnética (EM) interrumpe las células, material genético e interfiere con el proceso de reproducción (National Research Council, 1994).

Los filtros de membrana, tales como la **microfiltración (MF)** y **ultrafiltración (UF)**, además de eliminar la materia en suspensión, pueden eliminar las moléculas orgánicas grandes,

tales como: partículas coloidales, y muchos microorganismos. Las ventajas de la filtración de membrana en comparación con la filtración convencional son los requisitos de espacio más pequeño, la reducción de los requisitos de mano de obra, la facilidad de automatización de procesos, la eliminación de patógenos más eficaz (en particular con respecto a los protozoos y bacterias), y la demanda química potencialmente reducida. Una ventaja adicional es la generación de una calidad de los efluentes coherente con respecto a la materia en suspensión y agentes patógenos. Este tratamiento da lugar generalmente a la turbidez del efluente muy por debajo de 1 NTU (Asano et al., 2007).

La eficiencia de la **desinfección con cloro** depende de la temperatura del agua, pH, grado de mezcla, tiempo de contacto, la presencia de sustancias que interfieren, la concentración y la forma de cloración de especies, y la naturaleza y concentración de los organismos a ser destruido. En general, las bacterias son menos resistentes al cloro que son los virus, que a su vez son menos resistentes quistes. En la práctica, la cantidad de cloro añadido se determina empíricamente, basado en la calidad residual y efluentes deseados.

El cloro, a las concentraciones normales utilizado en el tratamiento de agua residual, no puede destruir los huevos de helmintos, *Giardia lamblia* y *Cryptosporidium spp.* (National Research Council, 1994).

También, el **ozono** es un agente desinfectante y un potente oxidante químico, destruye las bacterias y los virus por medio de la oxidación rápida, y la desinfección se logra en cuestión de minutos. El ozono es un desinfectante muy eficaz para el tratamiento avanzado de agua residual (National Research Council, 1994).

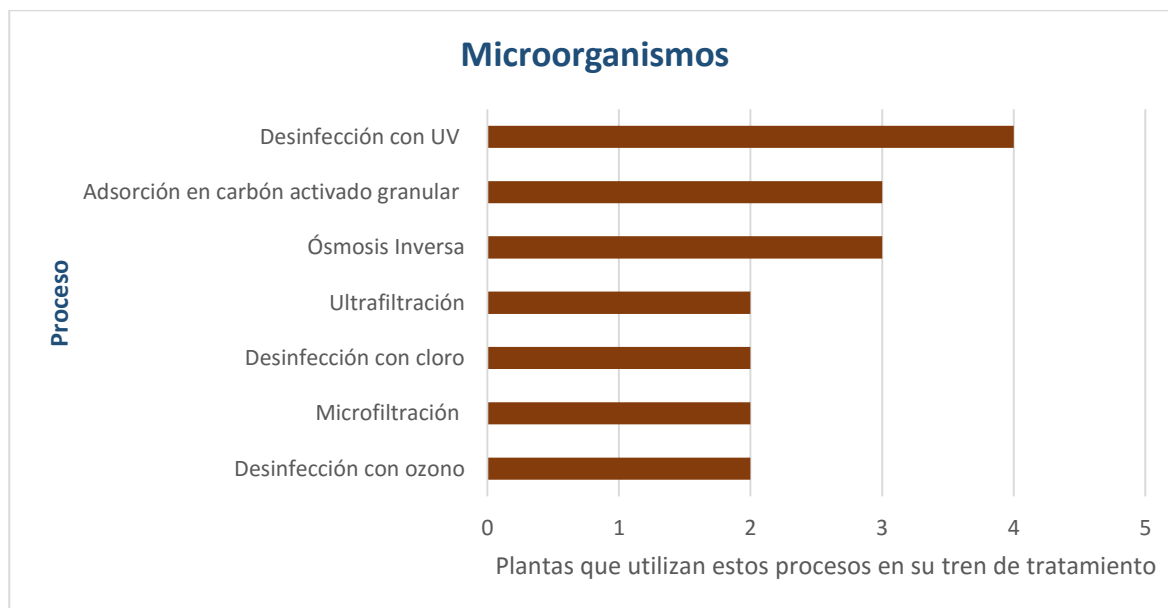


Imagen 31 Procesos empleados para la remoción de microorganismos.

Los procesos mayormente empleados en las plantas potabilizadoras para remover parámetros del grupo de metales y metaloides (arsénico, antimonio, bario, cadmio, cobre, cromo, mercurio, níquel, plomo, selenio, etc) son: ósmosis inversa, adsorción en carbón activado, ultrafiltración y microfiltración (ver imagen 32).

Uno de los procesos avanzados del tratamiento del agua residual más eficaz para la eliminación de componentes orgánicos biodegradables y refractarios es el uso de **carbón activado granular (GAC)**. El GAC puede reducir los niveles de productos químicos orgánicos sintéticos en las aguas residuales en un 75 a 85 por ciento. El mecanismo básico de la eliminación es por adsorción de los compuestos orgánicos en el carbono. El carbón activado granular eliminará varios iones metálicos, particularmente cadmio, cromo hexavalente, plata, y el selenio. También se ha utilizado para eliminar las especies sindicados, tales como el arsénico y el antimonio, de una corriente de ácido, y se reduce el mercurio a niveles bajos, en particular a valores de pH bajos (National Research Council, 1994).

La **ósmosis inversa** ha sido identificada por la EPA como la mejor tecnología disponible (MTD, *por sus siglas en inglés*) para la remoción de uranio, radio, alfa total, y las partículas beta y emisores de fotones. Se puede eliminar hasta el 99 por ciento de estos radionucleidos, así como muchos otros contaminantes (por ejemplo, arsénico, nitrato y los contaminantes microbianos) (EPA, 2015).

Las membranas **microfiltración (MF) y ultrafiltración (UF)** se utilizan principalmente para la eliminación de contaminantes en partículas y para la remoción de microorganismos, pero, también es posible remover productos químicos inorgánicos (por ejemplo, de fósforo, la dureza y los metales), con un tratamiento previo apropiado (EPA, 2015).

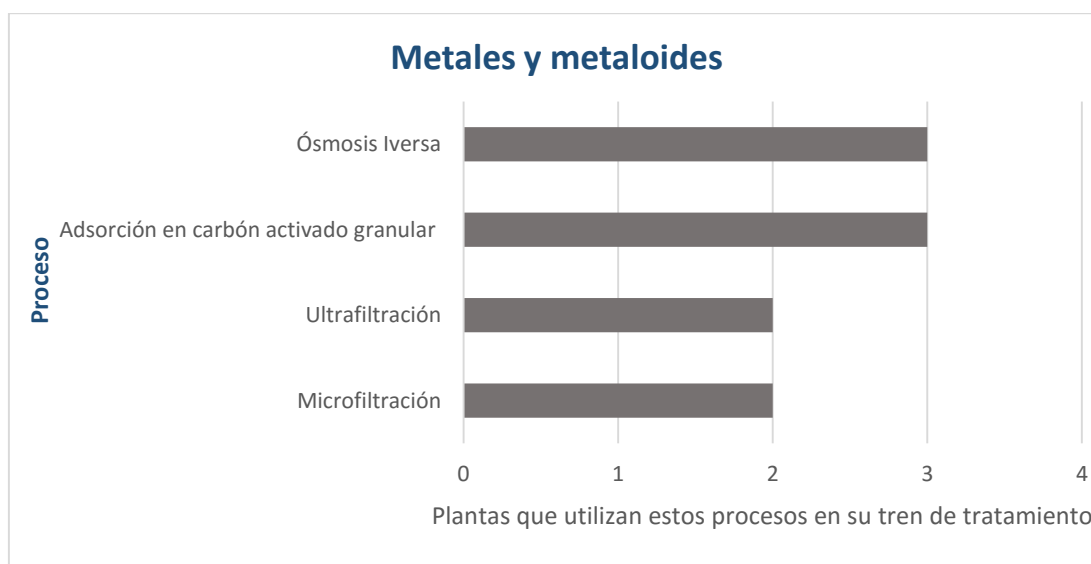


Imagen 32 Procesos empleados para la remoción de metales y metaloides.

Finalmente, el grupo relacionado a los subproductos de la desinfección como: Trihalometanos (Bromodiclorometano, bromoformo, Cloroformo, Dibromoclorometano), ácidos haloacéticos totales (Ácido tricloroacético, Ácido dicloroacético, Ácido cloroacético, etc.) y aniones (Bromatos, Cloratos, Cloritos, etc.), los procesos utilizados para la remoción de estos contaminantes es: adsorción con carbón activado granular y desinfección con ozono (ver imagen 33). Como ya se mencionó anteriormente, procesos como el GAC y el

ozono se pueden utilizar en un sistema de barreas múltiples, para la remoción de los subproductos de la desinfección.

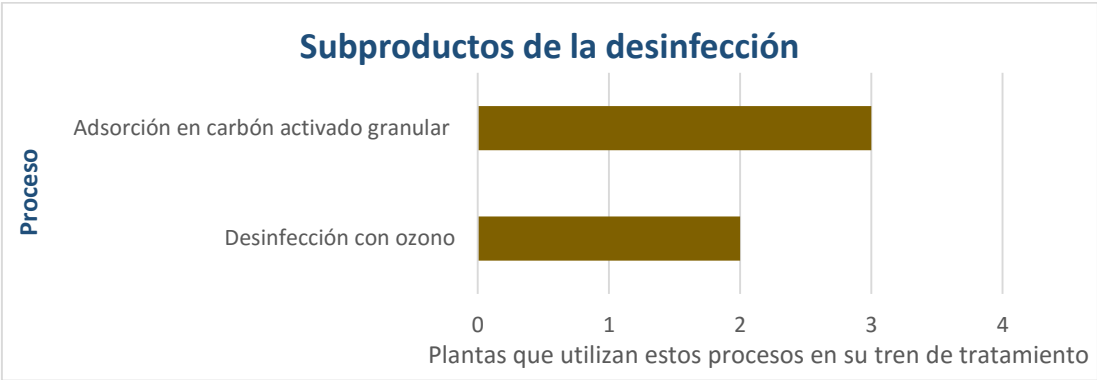


Imagen 33 Procesos empleados para la remoción de subproductos de la desinfección.

### 5.1.3 Diagnóstico de la calidad del agua obtenida con las diversas barreras múltiples que se emplean en los casos evaluados

El Sistema de reabastecimiento de agua subterránea ampliación de la planta Water Factory 21, es uno de los más avanzados en el tratamiento de agua residual en Estados Unidos y en el mundo, en la imagen 24 se presenta el diagrama de flujo del sistema de barreras múltiples empleado. El éxito del efluente de alta calidad radica en la utilización de membranas y desinfección mediante irradiación ultravioleta junto con la adición de ácido sulfúrico.

Para este análisis se ha seleccionado a la planta Groundwater replenishment system ya que es la planta cuenta con una base de datos para cada uno de las barreras que componen el sistema y que incluyen:

- Efluente secundario proveniente de la planta N.1 Orange Country Sanitation District en Fountain Valley
- Alimentación y efluente de la microfiltración
- Alimentación y producto de la ósmosis inversa
- Efluente del proceso avanzado de oxidación mediante Irradiación ultravioleta y
- Efluente final

Con la información recabada se calculó las eficiencias de remoción para cada proceso, así como la eficiencia final (Tabla 11). La calidad del efluente cumple con los parámetros de calidad de la Agencia de Protección al Medio Ambiente (Ver tabla 4).

Mediante procesos de barreras múltiples como la microfiltración, ósmosis inversa y desinfección ultravioleta, se obtienen porcentajes de remoción entre 97% y 99% en microorganismos, 94% y 95% de remoción el parámetros fisicoquímicos, 35% y 99% de remoción en parámetros inorgánicos y finalmente para la remoción del grupo de parámetros orgánicos, se logran porcentajes de remoción de entre 54% y 98%, con ellos se cumple con lo establecido en la regulación. Además, cabe hacer mención de la importancia de evaluar la calidad tanto para cada una de las barreras múltiples con la finalidad de garantizar la calidad del agua a los consumidores así como conocer el desempeño del sistema.

Tabla 11 Calidad del agua obtenida en las diversas barreras múltiples de la planta de Orange Country, California.

Parámetro		Unidades	Efluente Secundario	Alim. de la MF	Efluente MF	Alimentación de la OI	Producto de la OI	Producto de la UF UV/OAP	Producto Final	Límites permitidos en Orange Country, California para inyección	PROY NOM-250 SSA1-2014, NOM 014 NOM 015
Microbiológicos	Coliformes totales	MPN/100 mL	1'633,010	38,419 (97.6%)	< 2 -99.99%	na	< 2 -99.99%	< 2 -99.99%	< 2 -99.99%	2.2	Ausentes o no detectables
	Coliformes fecales	MPN/100 mL	532,663	5,904 (98.9%)	< 2 -99.99%	na	< 2 -99.99%	< 2 -99.99%	< 2 -99.99%	N/A	Ausentes o no detectables
Organoépticos	Color aparente (sin filtrar)	UNITS	na	na	na	35	< 3	na	< 3	15	20
Fisicoquímicos	Conductividad eléctrica	um/cm	1,649	1,723 <sup>1</sup> (-4.5)	1,715 (-4.0)	1,769.14 <sup>1</sup> (-7.2)	42.44 <sup>1</sup> -97.40%	54.82 -96.70%	88.72 <sup>1</sup> (94.6%)	N/A	1,200
	SDT	mg/L	949.8	na	na		20.2 -97.90%	22.5 -97.60%	45.4 -95.20%	500 <sup>2</sup>	na
	SST	mg/L	8.9	7.1 -20.60%	2.82 -68.50%	na	na	na	na	N/A	na
	Turbiedad	NTU	3.4	4.804 <sup>1</sup> (-40.1)	0.088 <sup>1</sup> -97.40%	0.184 <sup>1</sup> -94.60%	0.03 <sup>1</sup> -99.10%	na	0.156 <sup>1</sup> -95.50%	≤0.2 /≤1.5	5
	pH		7.63	7.42 <sup>1</sup>	7.49	6.65 <sup>1</sup>	5.52 <sup>1</sup>	5.43	8.59 <sup>1</sup>	06-sep	6.5 – 8.5
Inorgánicos	Aluminio	ug/L	18.55	na	na	10.83 -41.60%	2.35 -87.30%	2.98 -83.90%	7.27 -60.80%	200 <sup>2</sup>	200
	Arsénico	ug/L	1.58	na	na	1.37 -13.30%	< 1 -36.70%	< 1 -36.70%	< 1 -36.70%	10	50

Parámetro	Unidades	Efluente Secundario	Alim. de la MF	Efluente MF	Alimentación de la OI	Producto de la OI	Producto de la UF UV/OAP	Producto Final	Límites permitidos en Orange Country, California para inyección	PROY NOM-250 SSA1-2014, NOM 014 NOM 015	
Inorgánicos	Bario	ug/L	27.21	na	na	23.97 -11.90%	< 1 -96.30%	< 1 -96.30%	< 1 -96.30%	1,000	700
	Boro	mg/L	0.37	na	na	0.38 (-2.7%)	0.24 -35.10%	0.22 -40.50%	0.23 -37.80%	1	0.5
	Bromo	mg/L	na	na	na	na	na	na	< 0.1	N/A	na
	Cadmio	ug/L	< 1	na	na	< 1	< 1	< 1	< 1	5	5
	Calcio	mg/L	84.7	na	na	80.76 -4.60%	<1 -98.80%	<1 -98.80%	9.7 -88.60%	N/A	na
	Cloruro	mg/L	258.08	na	na	230.7 -10.60%	4 -98.50%	4.5 -98.20%	4.75 -98.20%	55	250
	Cromo	ug/L	< 1	na	na	< 1	< 1	< 1	< 1	50	50
	Cobre	ug/L	5.88	na	na	9.28 (-57.8)	< 1 -83.00%	< 1 -83.00%	< 1 -83.00%	1,000 <sup>2</sup>	na
	Cianuro	ug/L	9.3 <sup>3</sup>	6.7 <sup>3</sup> (28.0)	na	12.24 <sup>3</sup> (-31.6)	< 5 -46.20%	na	< 5 -46.20%	150	70
	Fluoruro	mg/L	0.93	na	na	na	na	na	< 0.1 -89.20%	2	0.7
	Fósforo	mg/L	0.57	na	na	na	na	na	< 0.01 (98.2%)	N/A	20
	Hierro	ug/L	451.25	na	na	113.7 -74.80%	< 1 -99.80%	< 1 -99.80%	2.98 -99.30%	300	300



Parámetro	Unidades	Efluente Secundario	Alim. de la MF	Efluente MF	Alimentación de la OI	Producto de la OI	Producto de la UF UV/OAP	Producto Final	Límites permitidos en Orange Country, California para inyección	PROY NOM-250 SSA1-2014, NOM 014 NOM 015	
Inorgánicos	Plomo	ug/L	< 1	na	na	< 1	< 1	< 1	< 1	15	10
	Magnesio	mg/L	25.7	na	na	23.68 -7.80%	<1 -96.10%	<1 -96.10%	<1 -96.10%	N/A	na
	Manganeso	ug/L	42.13	na	na	41.86 -0.60%	< 1 -97.60%	1.88 -95.50%	< 1 -97.60%	50	150
	Mercurio	ug/L	0.35	na	na	0.33 -5.70%	< 0.1 -71.40%	< 0.1 -71.40%	< 0.1 -71.40%	2	1
	Nitrato (como N)	mg/L	2.79	na	na	2.48 -11.10%	0.28 -90%	0.42 -84.90%	0.35 -87.50%	3 <sup>2</sup>	10
	Nitrito (como N)	mg/L	0.57	na	na	0.47 -17.50%	< 0.002 -99.60%	0.005 -99.10%	0.06 -89.50%	N/A	0.06
	Nitrógeno amoniacal	mg/L	20.53	na	na	21.15 (-3.0)	1.25 -93.90%	na	1.24 -94.00%	N/A	na
	Níquel	ug/L	6.94	na	na	6.83 -1.60%	< 1 -85.60%	< 1 -85.60%	< 1 -85.60%	100	20
	Selenio	ug/L	2.58	na	na	2.37 -8.10%	< 1 -61.20%	< 1 -61.20%	< 1 -61.20%	50	10
	Sílice	mg/L	22.18	na	na	22.73 (-2.5)	< 1 -95.50%	< 1 -95.50%	< 1 -95.50%	N/A	na
	Sodio	mg/L	217.83	na	na	204.4 -6.20%	6.5 -97%	7.09 -96.70%	6.48 -97%	45	na
Sulfato	mg/L	231.42	na	na	285.9 (-23.6)	< 5 -97.80%	< 0.5 -99.80%	< 0.5 -99.80%	100	na	

Parámetro		Unidades	Efluente Secundario	Alim. de la MF	Efluente MF	Alimentación de la OI	Producto de la OI	Producto de la UF UV/OAP	Producto Final	Límites permitidos en Orange Country, California para inyección	PROY NOM-250 SSA1-2014, NOM 014 NOM 015
Inorgánicos	Potasio	mg/L	17.34	na	na	16.88 -2.70%	0.41 -97.60%	0.44 -97.50%	0.36 -97.90%	N/A	na
	Plata	ug/L	< 1	na	na	< 1	< 1	< 1	< 1	100	100
	Zinc	ug/L	20.07	na	na	28.31 (-41.1)	2.08 -89.60%	1.33 -93.40%	0.78 -96.10%	5000	na
Orgánicos	Dureza total (como CaCO <sub>3</sub> )	mg/L	317	na	na	299 -5.70%	<1 -99.70%	<1 -99.70%	24.6 -92.20%	240 <sup>2</sup>	500
	Bicarbonato (como CaCO <sub>3</sub> )	mg/L	na	na	na	200.4	13.3	12.1	34.7	N/A	na
	Nitrógeno orgánico	mg/L	2.26	na	na	1.27 -43.80%	< 0.1 -95.60%	na	0.08 -96.50%	N/A	na
	Nitrógeno total	mg/L	25.79	na	na	25.35	na	na	1.75	5	40
	N-nitrosodimetilamina	ug/L	49.42	na	na	71 -30.4	35 (-41.2)	< 2	< 2	10	na
	1-4-Dioxano	mg/L	2.19	na	na	na	na	< 1 -54.30%	< 1 -54.30%	3	na
	Trihalometanos totales	ug/L	na	na	na	2	1.2	na	0.14	80	na
	Ácido dibromoacético	ug/L	na	na	na	< 1	< 1	na	< 1	60, TOTAL HAA5	na
	Ácido dicloroacético	ug/L	na	na	na	13.59	1.7	na	< 1		na

Parámetro		Unidades	Efluente Secundario	Alim. de la MF	Efluente MF	Alimentación de la OI	Producto de la OI	Producto de la UF UV/OAP	Producto Final	Límites permitidos en Orange Country, California para inyección	PROY NOM-250 SSA1-2014, NOM 014 NOM 015
Orgánicos	Ácido monobromoacético	ug/L	na	na	na	< 1	< 1	na	< 1	60, TOTAL HAA5	na
	Ácido monocloroacético	ug/L	na	na	na	< 1	< 1	na	< 1		na
	Ácido tricloroacético	ug/L	na	na	na	9.7	< 1	< 1	< 1		na
	COT (Sin filtrar)	mg/L	13.6	15 (-10.0)	na	10.13 <sup>1</sup> -25.40%	0.10 <sup>1</sup> -99.20%	na	0.2 -98.60%	0.5-0.7 <sup>2</sup>	1

Notas:

1 -Promedio, parámetro analizado en línea

2 -Ver App para mayor información

3 -Cianuro detectado acorde a los procedimientos del laboratorio

na= no establecido N/A= No Aplica, ( ) Porcentaje de remoción

### 5.1.4 Eficiencias de remoción de los CE reportada para diversos procesos de tratamiento de agua residual

Ahora y en el futuro, la creciente demanda de agua potable conducirá a muchas ciudades para poner en práctica programas de reutilización de agua directa o indirecta, donde los efluentes de agua residual se convierten en parte de las fuentes de agua potable. La contaminación de las fuentes que presenten los contaminantes emergentes como compuestos disruptores endocrinos (EDC, endocrine disrupting compounds), compuestos farmacéuticamente activos (PhACs, pharmaceutically active compounds) y de higiene personal (PCP, personal care products) es un hecho conocido en todo el mundo. La presencia de estos contaminantes emergentes es cada vez más preocupante en las plantas de tratamiento de agua potable que reciclan efluentes de agua residual o agua superficial mezclada con efluente de agua residual.

En la tabla 12, se reportan los porcentajes de remoción de diversos contaminantes emergentes presentes en el agua residual, estos porcentajes son con base a experiencia reportada en plantas de tratamiento en Estados Unidos.

Tratamiento	Porcentaje de remoción										
	B(A)P	Antibióticos	Farmacéuticos					Hormonas		Fragancias	NDMA
			DZP	CBZ	DCF	IBP	PCT	Esteroides	Anabólico		
Secundario (lodos activados)	nd	10-50	nd	-	10-50	>90	nd	>90	nd	50-90	-
Suelo acuífero	nd	nd	nd	25-50	>90	>90	>90	>90	nd	>90	>90
Almacenamiento en acuífero	nd	50-90	10-50	-	50-90	50-90	nd	>90	nd	-	-
Microfiltración	nd	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	nd	<20	
Ultrafiltración/Carbón activado en polvo (PAC)	nd	>90	>90	>90	>90	>90	nd	>90	nd	>90	>90
Nanofiltración	>80	50-80	50-80	50-80	50-80	50-80	50-80	50-80	50-80	50-80	
Ósmosis inversa	>80	>95	>95	>95	>95	>95	>95	>95	>95	>95	25-50
PAC	>80	20-80	50-80	50-80	20-50	<20	50-80	50-80	50-80	50-80	
Carbón activado granular		>90	>90	>90	>90	>90		>90		>90	>90
Ozonación	>80	>95	50-80	50-80	>95	50-80	>95	>95	>80	50-90	50-90
Oxidación avanzada		50-80	50-80	>80	>80	>80	>80	>80	>80	50-80	>90
Alto nivel Ultravioleta		20-80	<20	20-50	>80	20-50	>80	>80	20-50	nd	>90
Cloración	>80	>80	20-50	<20	>80	<20	>80	>80	<20	20-80	-
Cloraminación	50-80	<20	<20	<20	50-80	<20	>80	>80	<20	<20	

B (a) p = benzo (a) pireno; CBZ = carbamazepina, DBP = desinfección de subproductos; DCF = diclofenaco; DZP = diazepam; IBP = ibuprofeno; NDMA = N-nitrosodimetilamina; nd = no hay datos; PAC =carbón activado en polvo; PCT = paracetamol.  
<sup>1</sup>eritromicina, sulfametoxazol, triclosán, trimetoprim  
<sup>2</sup>etinilestradiol; estrona, estradiol y estriol  
<sup>3</sup>progesterona, testosterona

Tabla 12 Porcentajes de remoción de diversos contaminantes emergentes.

### **5.1.5 Selección de tecnología relacionada con el tratamiento de agua residual con fines de reúso indirecto sugeridas por el proyecto de NOM 250 (normatividad mexicana)**

La norma vigente tanto en materia de agua potable (NOM-127-SSA1, 1994) así como la de recarga al acuífero (NOM-014-CONAGUA, 2007) no establece lineamientos que considere el tipo de proceso de potabilización que puede emplear para producir la calidad deseada, hoy en día, se trabaja en un anteproyecto de norma que en caso de ser aprobada, deberá de sustituir a la actual, en este caso, dicho anteproyecto es interesante ya que sugiere una serie de procesos a utilizar de acuerdo al grupo de contaminante que desea removerse, por esta razón, dicho anteproyecto se analiza a continuación.

#### **5.1.5.1 Propuesta de Potabilización para recarga mediante el empleo de barreras múltiples**

En el proyecto de Norma Oficial Mexicana, PROY NOM-250 SSA1-2014<sup>1</sup>, “Agua para uso y consumo humano”, se establecen guías de procesos para la potabilización del agua y dado a que las exigencias de calidad requeridas para inyección deben de ser igual o superiores a la del agua potable es posible utilizarlas para este fin. Estas guías están basadas en el grupo de parámetros que se deben remover, haciendo énfasis en que dichos procesos pueden variar de acuerdo con los resultados de las diversas pruebas de tratabilidad que deben hacerse en cada caso.

##### a) Parámetros inorgánicos

Para el caso de los constituyentes inorgánicos (cianuros totales, dureza total, fluoruros, nitratos, nitritos, etc), los procesos sugeridos para remover la mayoría de los parámetros incluidos, son la ósmosis inversa (OI) y electrodiálisis, seguida del intercambio iónico y la oxidación química (ver imagen 34).

Los procesos que se proponen en la norma, para la remoción de parámetros inorgánicos, coinciden con los procesos que se utilizan en las PTAR's de los ocho casos de estudio, donde 3 utilizan ósmosis inversa y 2 plantas utilizan ozonización.

---

<sup>1</sup> PROY NOM-250 SSA1-2014 establece los límites máximos permisibles de la calidad del agua y requisitos sanitarios que los sistemas de abastecimiento públicos y privados de agua, deben cumplir, su control y vigilancia.

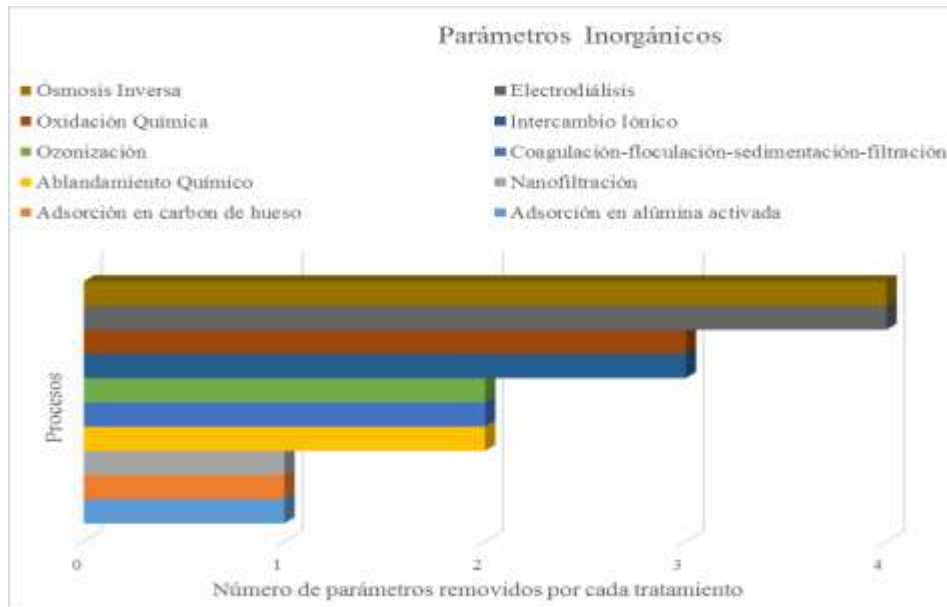


Imagen 34 Procesos de tratamiento empleados para la remoción de parámetros inorgánicos.

### b) Microorganismos

Con relación al grupo de microorganismos (*E. coli*, coliformes fecales, organismos termotolerantes y enterobacterias patógenas, *Giardia* spp.) incluyendo las fitotoxinas, los métodos sugeridos y que eliminan el mayor número de microorganismos, serán por excelencia: el cloro, el ozono, la filtración en diversas etapas y la coagulación-floculación acompañada de una sedimentación y filtración lenta (ver imagen 35).

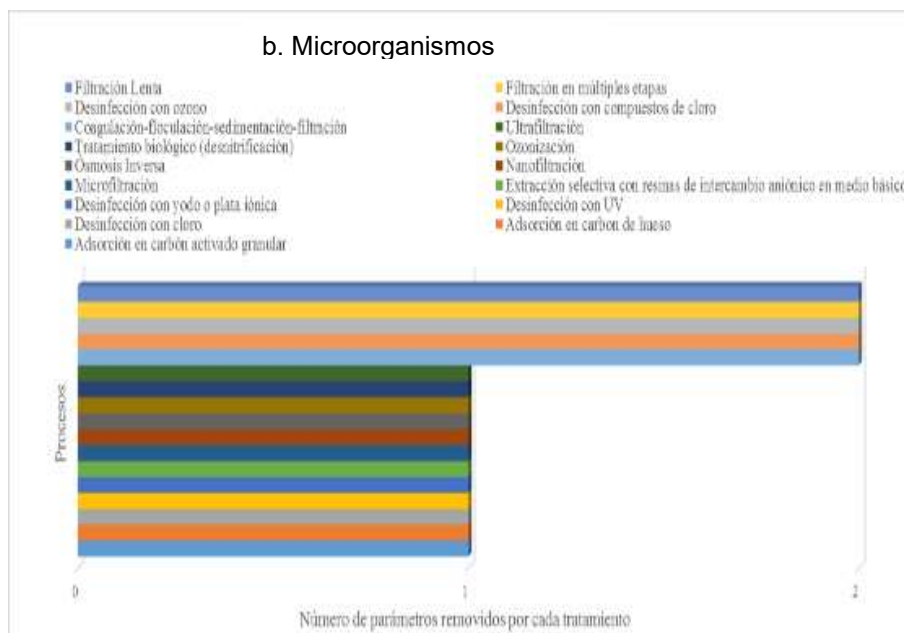


Imagen 35 Procesos de tratamiento empleados para la remoción de microorganismos.

Para la remoción de microorganismos, en la norma se establecen los mismos procesos para remover el mayor número de parámetros que los que se utilizan en los ocho casos de estudios, donde, cuatro PTAR's utilizan radiación ultravioleta, tres ósmosis inversa y dos utilizan ozono, cloro, microfiltración o ultrafiltración para la remoción de microorganismos.

### c) Subproductos de la desinfección

En el caso de que se presenten subproductos de la desinfección tales como: trihalometanos (bromodiclorometano, bromoformo, cloroformo, dibromoclorometano), ácidos haloacéticos totales (ácido tricloroacético, ácido dicloroacético, ácido cloroacético, etc.), entre los métodos mayormente recomendados para la remoción se encuentran: adsorción con carbón activado (CA), ozonación (incluyendo la filtración biológica activa), desorción con aire ("air stripping") y un sistema de barreras múltiples a base de coagulación-floculación, sedimentación y filtración (ver imagen 36).

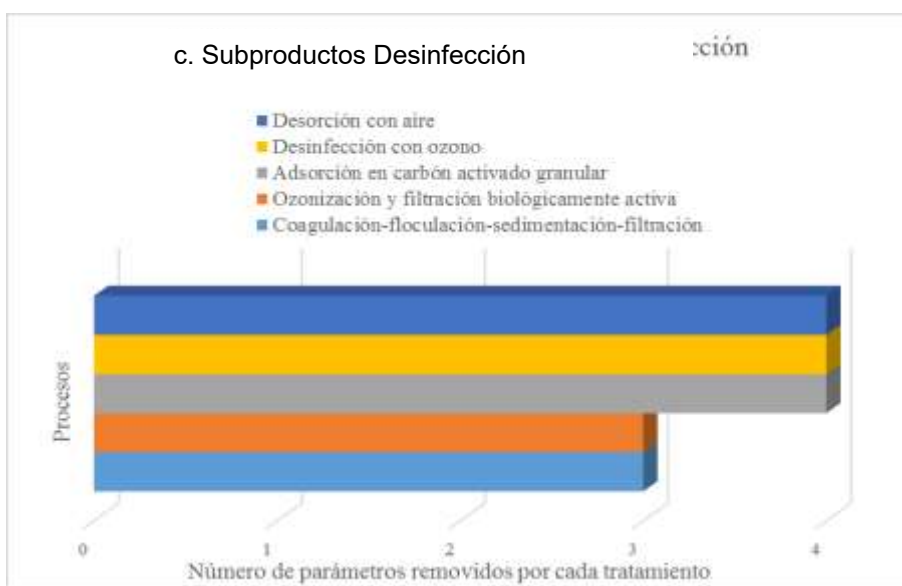


Imagen 36 Procesos de tratamiento empleados para la remoción de productos de la desinfección.

La tecnología empleada en los casos de estudio para la remoción de este grupo de contaminantes es a base de procesos como: adsorción en carbón activado granular y desinfección con ozono, estos procesos utilizados para remover subproductos de la desinfección son los mismos que se establecen en la norma.

### d) Metales y metaloides

En el grupo de los metales y metaloides (Arsénico, Antimonio, Bario, Cadmio, Cobre, Cromo, Mercurio, Níquel, Plomo, Selenio, etc), destacan los procesos de OI y electrodiálisis, como aquellos que removerán un mayor número de los constituyentes establecidos en la norma, seguido del Intercambio catiónico y la precipitación (ver imagen 37).

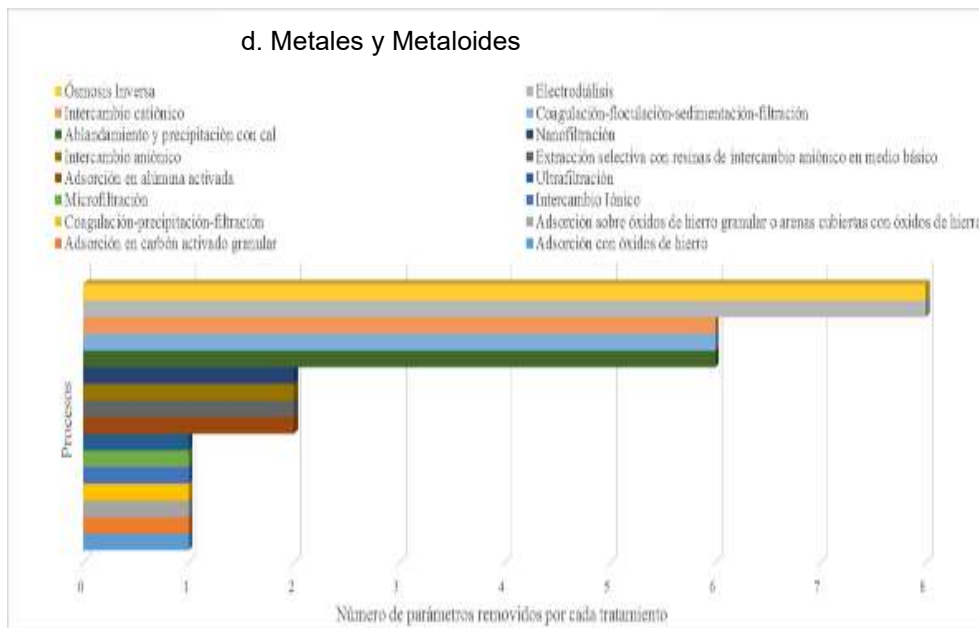


Imagen 37 Procesos de tratamiento empleados para la remoción de metales y metaloides.

Los procesos que remueven el mayor número de metales y metaloides propuestos por la norma, coincide con los procesos utilizados en los ocho casos estudio, las tecnologías utilizadas para la remoción de este grupo de contaminantes en las PTAR'S son procesos como: carbón activado granular, ósmosis inversa y membranas (microfiltración y ultrafiltración).

Finalmente, para el caso de la remoción de formaldehídos, compuestos orgánicos halogenados adsorbibles fijos (atrazina, clordano, DDT, lindano, etc.), compuestos orgánicos no halogenados (acrilamida, benzopireno, isoproturon, etc.), compuestos orgánicos halogenados adsorbibles purgables (cloruro de vinilo, diclorometano, 1,2-dicloroetano, 1,2-diclorobenceno, etc.) y compuestos de carbono orgánico purgable (benceno, estireno, etilbenceno, tolueno, etc.) se puede optar por los métodos de oxidación química, CA, OI, filtración en múltiples etapas, nanofiltración, arrastre con aire "air stripping", microfiltración y ultrafiltración seguida de desinfección con ozono. Cabe aclarar que, generalmente con estos métodos también se remueven los contaminantes emergentes.

Los procesos propuestos en el proyecto de la Norma Oficial Mexicana (PROY NOM-250 SSA1-2014), son similares a los procesos que se utilizan en los sistemas de barreras múltiples. Las tecnologías más comunes entre las 8 PTAR'S (ósmosis inversa, nanofiltración, desinfección con ozono, desinfección con cloro, adsorción en carbón activado granular) son las que a su vez remueven el mayor número de parámetros., su similitud es posible que se deba al éxito que han demostrado estos procesos, se refleja en los altos porcentajes de remoción reportados por las PTAR'S, además de cumplir satisfactoriamente con lo establecido en la normatividad que rige en cada país.

**5.1.5.2 Criterios técnicos para la selección de un sistema de barreras múltiples en los estudios de recarga artificial de los acuíferos**



Una vez decidido que la técnica de la recarga artificial de acuíferos puede constituir una herramienta útil, válida y competitiva dentro de los distintos sistemas de regulación capaces de satisfacer una determinada demanda hídrica, es preciso evaluar la viabilidad de la operación de recarga artificial mediante el análisis y estudio de los factores que se relacionan a continuación:

- Origen del agua de recarga.
- Características del acuífero receptor.
- Análisis de las diferentes alternativas de instalaciones de recarga, así como de las auxiliares de control, tratamiento y transporte del agua de recarga.
- Destino final del agua recargada

➤ ***Características del medio físico***

Los principales elementos sometidos a evaluación del sitio propuesto para instalar estructuras destinadas a la recarga son las características físicas del medio, ya que de ellas depende la existencia de condiciones adecuadas para la absorción y suministro de agua hacia el acuífero.

Dentro de las características principales que pueden definir a un sitio como óptimo, se encuentran:

- Capacidad de los materiales geológicos para el almacenamiento del agua subterránea.
- Espesor de la zona saturada.
- Nivel de confinamiento del acuífero.
- Vulnerabilidad del acuífero a la contaminación

➤ ***Características del sistema hidrológico***

El entorno hidrológico también representa un factor fundamental de evaluación en la toma de decisiones acerca del sitio óptimo para recarga. Es de suma importancia conocer la capacidad de renovación del agua y la disponibilidad de la misma. El aseguramiento de abastecer al sistema con una fuente de agua de manera periódica renovada implica un proceso más confiable y sostenible a largo plazo. Los aspectos que pueden caracterizar el sistema hidrológico son:

- Ubicación y distribución de zonas de recarga.
- Localización de zonas de descarga natural de agua en el ecosistema.
- Distribución de los cuerpos de aguas superficiales.
- Ubicación de las zonas de explotación intensiva del agua subterránea.
- Disponibilidad del agua superficial y subterránea.

➤ **Características del comportamiento hidráulico**

Al igual que los aspectos anteriormente mencionados, el análisis del comportamiento hidráulico resulta fundamental para la elección del sitio y mecanismo para recargar agua. Caracterizarlo implica tomar en cuenta la siguiente serie de factores:

- Direcciones de flujo del agua subterránea.
- Cotas o elevaciones del nivel estático en el agua subterránea.
- Profundidad a la que se encuentran los niveles de agua subterránea.
- Distribución de la conductividad hidráulica en el acuífero.

➤ **Características de la calidad del agua disponible**

La calidad del agua destinada para recarga es sin duda, un factor decisivo para el establecimiento del mecanismo de recarga en el sitio seleccionado. Se debe garantizar que la calidad del agua presente en el acuífero no resulte afectada por el flujo que se le está suministrando. Se requiere un análisis de ciertas características específicas de acuerdo a la normatividad vigente para evitar en la medida de lo posible la recarga de agua contaminada.

Dentro de las características que pueden definir la calidad del agua se tiene:

- Calidad natural del agua subterránea
- Calidad del agua de recarga
- Presencia de actividades contaminantes
- Comportamiento geoquímico
- Riesgo de contaminación de agua

### **5.1.6 Estrategias a considerar para la implementación de un sistema de recarga**

Aunado a la calidad del agua y las tecnologías que deben emplearse para acondicionar el agua, en todo caso de estudio de recarga al acuífero se deben realizar una serie de consideraciones ya que de esto depende el éxito del sistema las cuales se enlistan a continuación de estudio éxitos son las siguientes:

- ❖ Estudios Geohidrológicos
- ❖ Todos los proyectos parten de un efluente secundario para acoplar un sistema de barreras múltiples
- ❖ Se operaron Plantas Piloto más de dos años para evaluar las barreras múltiples
- ❖ Monitoreo constante de la calidad del agua
- ❖ Estudios de ecotoxicidad, carcinogénicos, y reproductivos
- ❖ Programa de sensibilización de la población
- ❖ Es muy importante tomar en cuenta los costos para el cumplimiento de la NOM 015 y NOM 014, que deberá ser considerado debido a que la evaluación de la calidad para el cumplimiento es inaceptable.

## 5.1.7 Identificación de zonas con potencial para integrarse a un plan de reúso indirecto

### 5.1.7.1 Zonas potenciales para recarga de acuífero

Para efectos de planeación de las zonas con potencial para integrarse a un plan de reúso indirecto, se identificaron 15 zonas metropolitanas con población mayor a 1,000,000 habitantes para 2010 y con proyecciones para el año 2030. En todas las ZMs (excepto Morelos) existe infraestructura para el tratamiento de más de 1000 L/s de agua residual municipal. En las RHA (Región hidrológica Administrativa) donde se localizan 9 de estas ZMs la presión sobre el recurso es fuerte, y en la ZM del Valle de México es muy fuerte situación que sugiere identificar la viabilidad de la planeación del reúso de agua renovada en las ZMs identificadas.

Hasta ahora se tiene conocimiento de la existencia de 11 proyectos de recarga de acuíferos o *Managed Aquifer Recharge* (MAR por sus siglas en inglés) en México, reconocidos oficialmente por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Sin embargo, del total de proyectos solo tres de estos se encuentran en operación, a saber, San Luis Río Colorado, Son.; Región Lagunera, Coah. y Valle de México (CD MX) (Palma *et al.*, 2014) representando un volumen total del 3.54 m<sup>3</sup>/s. Pese a que el impacto de los proyectos en operación (0.11 km<sup>3</sup>) pudiera ser marginal tomando en cuenta la sobreexplotación de los acuíferos (6.5 km<sup>3</sup> anuales), por ello es imperativo promover la ejecución de los anteproyectos MAR que permitan la gestión adecuada de este potencial. Para esto, es necesario cambiar la regulación para hacer atractiva la opción de recarga y también del reúso.

En 15 ZMs donde actualmente la presión sobre el recurso es fuerte a muy fuerte, el promedio de la dotación diaria *per cápita* de agua varía de 171 a 1633 L/hab-d, y se encuentran en RHA donde hay sobreexplotación de los acuíferos situación que se espera no cambie a lo largo del tiempo en términos de agua disponible, si no se toman medidas que tiendan a disminuir esta tendencia. Esta situación sugiere identificar la viabilidad de la planeación del reúso de agua renovada en las 20 ZMs.

Basados en la revisión de la infraestructura actual disponible con potencial para el reúso; Se identificaron 23 PTAR's con una capacidad instalada total de 6,150 L/s las cuales generaron un gasto de 5,280 L/s de agua tratada en 2013 (85% de la capacidad instalada). Del total de plantas seleccionadas, 7 PTAR's tienen una capacidad de tratamiento entre 400-1000 L/s, 7 de ellas entre 1000-1500 L/s, mientras que sólo 4 plantas producen un volumen de agua de entre 1500-2000 L/s y finalmente solo 5 plantas generan un volumen de agua tratada mayor a 2000 L/s.

El proceso de tratamiento dominante en las plantas de tratamiento seleccionadas es el de lodos activados (22 PTAR's). A ese proceso es factible incorporar procesos adicionales que cumplirán el papel de barreras de tratamiento para lograr la calidad de agua que cada opción de reúso viable requiera.

Tabla 13 Zonas potenciales para implementar un plan de reúso de agua renovada. Fuente: Elaborada con información de Chávez et al., 2015.

ZM mayores a 1X10 <sup>6</sup> hab en términos del grado de presión sobre el recurso: horizonte 2010-2030.								PTAR's con capacidad instalada igual o mayor a 1 m3/s (CONAGUA, 2013).									
Estado	Zona Metropolitana	RHA	Población		Grado de presión	Dotación, L/hab-día	Acuífero sobreexplotado	Estado	Municipio	Localidad	Nombre PTAR	Proceso	Capacidad instalada L/s	Caudal tratado L/s	Uso de infraestructura <sup>1</sup> %		
			2010	2030													
D.F. Edo México	Valle de México	XIII	20,116,842	22,156,238	Muy fuerte		Si	CD. MX.	Iztapalapa	Iztapalapa	Cerro de la Estrella	LA	4,000	2,020	51%		
								México	Chimalhuacán	Chimalhuacán	Lago de Texcoco I	LA	1,000	800	80%		
México	Toluca	VIII	1,846,116	2,442,373	Fuerte	205	Si	México	Toluca	Toluca de Lerdo	Toluca Norte	Dual	1,250	1,200	96%		
								México	Toluca	Toluca	Toluca Oriente	LA	1,000	891	89%		
Jalisco	Guadalajara	VIII	4,434,878	5,443,235	Fuerte	202	Si	Jalisco	Zapopan	El Tempisque	Agua prieta	LA	8,500	1,700	20%		
								Jalisco	Tlajomulco de Zúñiga	Tlajomulco de Zúñiga	El Ahogado	LA	2,250	2,100	93%		
								Jalisco	Puerto Vallarta	Puerto Vallarta	Seapal Norte II	LA	1,125	1,100	98%		
Nuevo León	Monterrey	VI	4,089,962	4,988,081	Fuerte	253	No	Nuevo León	Pesquería	Dulces Nombres	Dulces Nombres	LA	7,500	5,221	70%		
								Nuevo León	General Escobedo	Cd. General Escobedo	Norte	LA	3,000	2,325	77%		
								Nuevo León	Apodaca	Agua Fria	Noreste	LA	2,500	1,171	47%		
Puebla Tlaxcala	Puebla-Tlaxcala	IV	2,668,437	3,327,083	Fuerte	171	No	Puebla	Puebla	Puebla	Puebla San Francisco	PA	1,100	1,292	117%		
Baja California	Tijuana	I	1,751,430	3,131,823	Fuerte	178	No	Baja California	Mexicali	Mexicali	Zaragoza	L. aireadas	1,300	760	58%		
								Baja California	Tijuana	Tijuana	San Antonio de los Buenos	L. aireadas	1,100	905	82%		
	Mexicali			936,826				1,277,889	300	Si	Baja California	Tijuana	Tijuana	Binacional o Pitar	LA	1,100	1,070
Guanajuato	León	VIII	1,609,504	2,107,052	Fuerte	-	Si	Guanajuato	León	León de los Aldama	León	PoS	2,500	1,525	61%		
Chihuahua	Chihuahua	VI	852,533	1,017,917	Fuerte	417	Si	Chihuahua	Chihuahua	Chihuahua	Chihuahua "Sur"	LA	2,500	1,620	65%		
								Chihuahua	Chihuahua	Chihuahua	Norte	LA	1,200	430	36%		
	Juárez		1,332,131	1,806,764				347	Si	Chihuahua	Juárez	Juárez	Sur	LA	2,000	1,620	81%
										Chihuahua	Juárez	Juárez	Norte	LA	1,600	1,350	84%
Coahuila	La Laguna	VII	1,215,817	1,446,287	Fuerte	299	Si	Coahuila	Torreón	Torreón	Torreón	L. estab.	1,900	1,400	74%		
	Saltillo		823,128	1,103,798				174	No	Coahuila	Saltillo	Saltillo	Principal	LA	1,200	900	75%
San Luis Potosí	S.L.P. – S. de G. Sánchez	VII	1,040,443	1,315,607	Fuerte	312	Si	San Luis Potosí	San Luis Potosí	San Luis Potosí	Tanque Tenorio	Dual	1,050	1,000	95%		
Aguascalientes	Aguascalientes	VIII	932,369	1,228,409	Fuerte	302	Si	Aguascalientes	Aguascalientes	Aguascalientes	Aguascalientes	Dual	2,000	1,980	99%		
Morelos	Cuernavaca	IV	876,083	1,039,929	Fuerte	546	No										

### 5.1.8 Propuesta de tren de tratamiento para la posible implementación en México

Con el análisis realizado en el capítulo 5.1.3 “Diagnóstico de la calidad del agua obtenida con las diversas barreras múltiples que se emplean en los casos evaluados” se puede concluir que el uso de tecnología con sistema de barreras múltiples utilizado en los casos de estudio ha resultado satisfactorio y además cumple con todos los estándares de calidad de agua potable y de recarga de agua al acuífero. Para garantizar el éxito de la implementación de los proyectos de reúso con agua renovada, se hace énfasis en la necesidad de contar con plantas piloto en donde se establezcan las eficiencias de remoción de los parámetros que limiten su uso en cada caso. Por otro lado, es importante mencionar que el enfoque propuesto de tratamiento mediante barreras múltiples, permite asegurar una calidad adecuada del agua en función del tipo de reúso, ya que actúa a través de diferentes vías de retención o eliminación de contaminantes mediante varias etapas, de manera que si un proceso falla el siguiente completará la tarea de esta manera las propuestas del tren de tratamiento para México serían las siguientes:

#### PROPUESTA 1

La tecnología implementada en el caso de estudio 1 “Groundwater replenishment system” es la más apta para implementar en México, comenzar operando una planta piloto utilizando el sistema de barreras múltiples utilizada en este caso de estudio (ver imagen 24) es una opción para el saneamiento de las fuentes subterráneas sobreexplotadas en el país. Ya que las eficiencias de remoción reportadas son mayores al 90% y la calidad del efluente cumple satisfactoriamente con los estándares de calidad de la Agencia de Protección al Medio Ambiente y con lo establecido en la NOM-014-CONAGUA-2003 en México. Cabe aclarar, que para cada caso en específico, un estudio en planta piloto debe llevarse a cabo para confirmar dichas eficiencias, además de contar con la calidad del agua que se desea potabilizar para establecer si es o no necesario alguna barrera múltiple adicional.

#### PROPUESTA 2

Para la propuesta 2, se hizo una revisión de los procesos empleados (ver tabla 10) para remover los parámetros que se establecen en la NOM-014. Se consideró que el influente de esta planta, parte de un efluente de tratamiento secundario, por lo tanto, los parámetros a remover son: físicos, Inorgánicos, microorganismos, metales y metaloides, subproductos de la desinfección y compuestos orgánicos. En la imagen 39, se muestran los procesos empleados para la remoción de dichos parámetros, cabe mencionar que para la selección de estos procesos se hizo con base a la experiencia reportada en los casos de estudio que han demostrado éxito, se consideró la tecnología mayormente empleada y que además demuestra tener altos porcentajes de remoción, donde el efluente cumple satisfactoriamente con lo establecido en las Normas mexicanas. El tren de tratamiento que se presenta, puede tener múltiples variaciones, ya que las características del influente son variables de un lugar a otro.

El sistema de múltiples barreras estará conformado de la siguiente manera de acuerdo al grupo de parámetros que se desea remover:

- ❖ Para la remoción de parámetros físicos (turbiedad y pH), se empleará ósmosis inversa y una neutralización.
- ❖ Para la remoción de parámetros inorgánicos (Dureza total, fluoruros, nitrógeno como Nitratos, Nitrógeno como Nitritos), se empleará ósmosis inversa.
- ❖ Para la remoción de microorganismos, se sugiere utilizar como procesos de desinfección mediante luz ultravioleta para la remoción de bacterias mientras que para remover quistes y Microcistina-LR se podrá utilizar la ósmosis inversa.
- ❖ Los metales y metaloides tales como arsénico, cadmio, cobre, cromo, mercurio, níquel, plomo y selenio podrán separarse con la ósmosis inversa, sin embargo, si el agua presenta problemas de con antimonio y bario un ablandamiento y precipitación con cal será necesario.
- ❖ Remoción de subproductos de la desinfección (THMs) es posible emplear un sistema de carbón activado, mientras que para para la remoción de ácidos haloacéticos totales se removerán con ozonación y filtración.
- ❖ Finalmente, para la remoción de compuestos orgánicos, se podrá emplear un sistema de carbón activado u osmosis inversa.

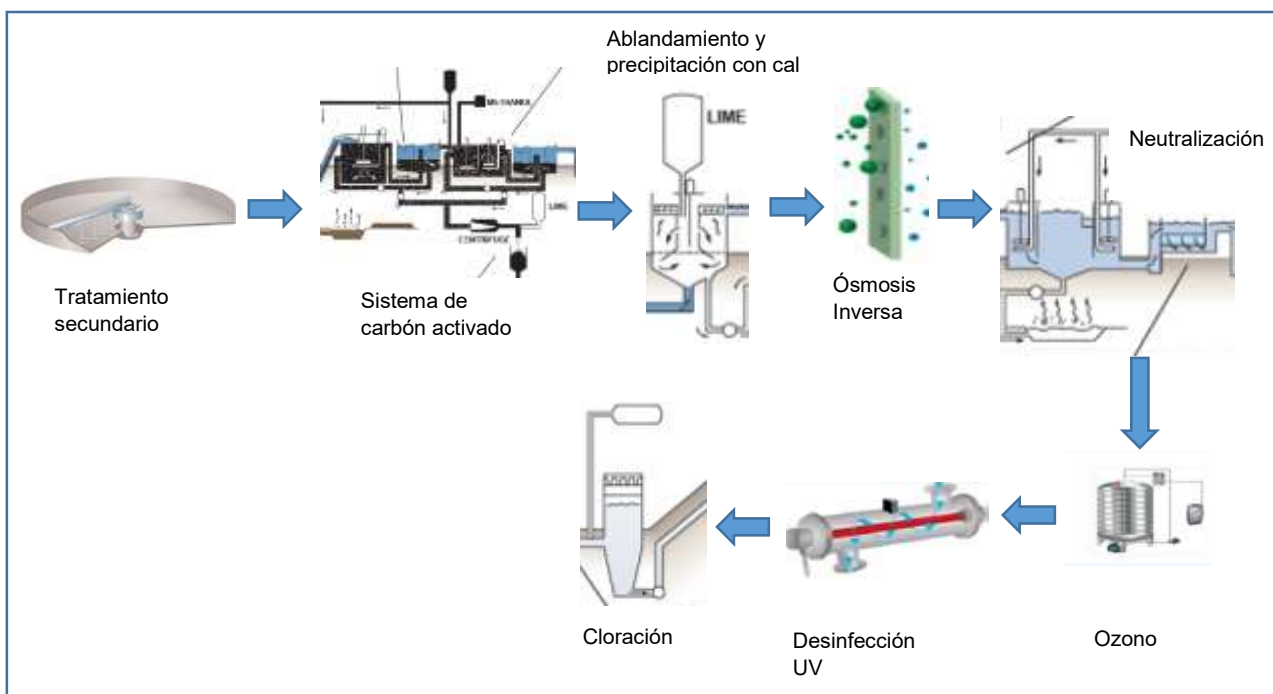


Imagen 38 Esquema del sistema de barreras múltiples de la propuesta 2.

En México, se debe de atender urgentemente el tema de sobreexplotación de fuentes subterráneas, para asegurar el abastecimiento de agua a la población, para ello es importante implementar el reúso potable indirecto, sin embargo, el tratamiento mediante barreras múltiples debe ser considerado para garantizar la calidad del agua y disminuir los riesgos, por un lado, hay avances en las normatividades, por el otro, hay experiencia a nivel internacional que demuestra que es posible implementar sistemas de potabilización en PTAR secundario existentes, únicamente que falta política para impulsar estudios serios ya que existe un amplio potencial en México para reúso del agua para recarga de los acuíferos.

Procesos para remover elementos y compuestos presentes en el agua residual

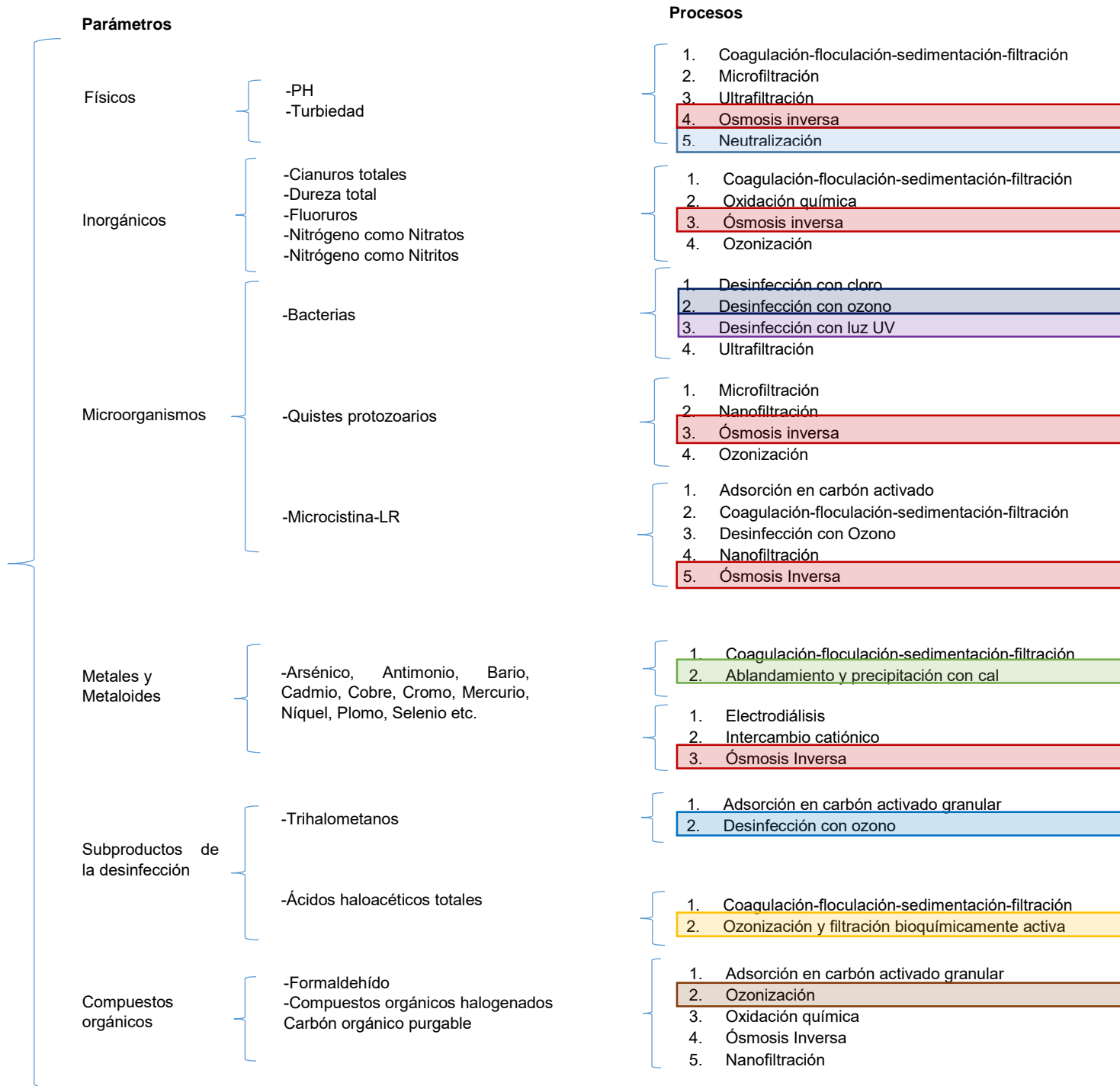


Imagen 39 Esquema para la selección del sistema de barreras múltiples.

## CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A partir del análisis de resultados se establece que el **reúso potable indirecto** es un alternativa utilizada como fuente de agua subterránea, proyectos de reciclaje de agua para usos finales no potables son una práctica común con más de 3 300 proyectos registrados en todo el mundo en 2005, esta opción ha ido en crecimiento a lo largo de los años como consecuencia del crecimiento exponencial de la población y de una mala gestión del recurso.

Los proyectos de reúso potable indirecto, que han resultado exitosos, demuestran su viabilidad a gran escala y su éxito se debe a las estrategias utilizadas como los estudios geohidrológicos, la implementación de una planta piloto a base de barreras múltiples (membranas, desinfección ultravioleta, cloración o desinfección con ozono, etc.) durante un periodo de tiempo prolongado, realización de un monitoreo constante.

Todos los proyectos de reúso indirecto parte de un efluente secundario seguido por un tratamiento avanzado, la tecnología empleada a base de barreras múltiples garantiza que si un elemento falla el siguiente lo removerá.

La confiabilidad de los sistema de barreras múltiples fue determinada a partir de los resultados que se reportan en la planta *Groundwater replenishment system*, que es la planta más grande del mundo, localizada en Estados Unidos, los porcentajes de remoción que fluctúan entre 80% y 99%, dependiendo del parámetro evaluado, fueron suficiente para cumplir con lo que establece la agencia reguladora (EPA) para reúso potable indirecto.

El estado del arte del reúso potable indirecto fue determinado en ocho casos de estudio que tienen en común la inyección de efluente de agua al acuífero, estos proyectos mediante tecnología avanzada conformado por sistema de barreras múltiples, permite asegurar una calidad adecuada del agua en función del tipo de reúso, ya que actúa a través de diferentes vías de retención o eliminación de contaminantes mediante varias etapas, de manera que si un proceso falla el siguiente completará la tarea.

Por otra parte, la comparación realizada con respecto a los criterios internacionales con las normas nacionales en materia de calidad que debe tener el agua destinada al reúso potable indirecto, resultó similar a los establecido en la NOM-014-CONAGUA-2003, que establece los requisitos que deben cumplir con la calidad del agua, utilizados en los sistemas de recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada. Países como Estados Unidos, Australia y los que integran la Unión Europea, evalúan parámetros de calidad que difieren a lo establecido en la NOM-014, ya que debe tomarse en cuenta que la calidad varia de un lugar a otro y las exigencias pueden ser más rígidas o más flexibles.

Con base a lo anterior se concluye que los parámetros establecidos en la Norma Mexicana para recarga de acuífero compite con las normas internacionales en cuanto a las exigencias de calidad del agua, por lo tanto la normatividad nacional está bien, lo que hace falta que en cada proyecto de recarga se cuente con una planta piloto y que la calidad sea



monitoreada por al menos un año, aunado con una mejora de los sistemas de monitoreo en el país, para evitar la contaminación de las reservas de agua subterránea, proteger los ecosistemas, también, proteger la salud de la población ya que finalmente son los que utilizan este preciado líquido.

México es un país que necesita urgentemente implementar el reúso potable indirecto ya que de 653 acuíferos existentes 106 se encuentran es estado de sobreexplotación, y además la población va incrementando exponencialmente. La infraestructura existente de tratamiento y potabilización de agua residual está demostrando ser insuficiente y obsoleta para remediar este problema. Otro grave problema al que nos enfrentamos es a la recolección de aguas municipales, ya que la infraestructura es insuficiente lo cual provoca que las plantas en operación no trabajen al 100% de su capacidad instalada.

A partir de la infraestructura de tratamiento de agua residual instalada en el país disponible (Lodos activados); de su localización con respecto a las actuales grandes zonas urbanas y las proyectadas al 2030, además de la ubicación de los acuíferos sobreexplotados, fueron identificadas 15 zonas metropolitanas ubicadas en 12 estados con potencial para promover el reúso potable indirecto en México. Al considerar en términos generales los factores mencionados; se seleccionaron las plantas con una capacidad instalada mayor o igual a 1 m<sup>3</sup>/s (1,000 L/s) que operaron en 2013. Las zonas con potencial para implementar proyectos de plantas piloto se ubican principalmente en el centro (CDMX, México, Tlaxcala, Puebla y Morelos) y norte (Chihuahua, Coahuila, Guanajuato, BC) del país, también estados como Jalisco, Nuevo Leon y Aguascalientes San Luis Potosí donde el grado de presión es mayor lo cual trae como consecuencia la sobreexplotación de acuíferos.

Finalmente, con base en la revisión de los sistemas de barreras múltiples que integran los proyectos evaluados, se proponen dos esquemas de potabilización que son:

#### Propuesta 1

El sistema de barreras múltiples que conforma esta propuesta es a base de membranas (microfiltración y ósmosis inversa) y desinfección con radiación ultravioleta, con este sistema se logra remover hasta un 99.9% de microorganismos, 95% en parámetros fisicoquímicos, de 35% hasta 99% de remoción en compuestos inorgánicos, y desde un 54% hasta un 99% en parámetros orgánicos, con estos porcentajes de remoción se cumple satisfactoriamente lo establecido en la NOM-014-CONAGUA-2003, lo cual hace que la propuesta sea viable, y aplicable en México.

#### Propuesta 2

La segunda propuesta fue realizada con base al proyecto de la Norma Oficial Mexicana, PROY NOM-250 SSA1-2014, donde se establecen guías de procesos para la potabilización del agua, además se consideró la tecnología que logra remover el mayor porcentaje de contaminantes. El sistema de barreras múltiples que conforma esta propuesta es: mediante ósmosis inversa para la remoción de parámetros físicos (turbiedad), inorgánicos (Dureza total, fluoruros, nitrógeno como Nitratos, Nitrógeno como Nitritos), metales y metaloides (arsénico, cadmio, cobre, cromo, mercurio, níquel, plomo y selenio), y compuestos

orgánicos. Para la estabilización del pH se propone una neutralización mediante la adición de algún ácido (Ácido Sulfúrico o Dióxido de carbono) o un agente alcalinizante (Hidróxido de calcio o hidróxido de sodio). Para la remoción de microorganismos se empleará desinfección mediante radiación ultravioleta, en cuanto a la remoción de subproductos de la desinfección se propone un sistema de carbón activado y ozonización para la remoción de ácidos haloacéticos, si hubiese presencia de antimonio y vario será necesario emplear un sistema de ablandamiento y precipitación con cal, finalmente, se adiciona cloro para la protección durante el recorrido hasta su destino final. Con esta propuesta se pretende alcanzar altos porcentajes de remoción para cumplir con lo establecido en la NOM-014-CONAGUA-2003, y así poder inyectar el efluente al acuífero.

## **RECOMENDACIONES**

Se recomienda que en las zonas localizadas con potencial para promover el reúso potable indirecto y la localización de las 23 plantas factibles para la implementación de un sistema de barreras múltiples en el país, se implementen plantas piloto por un periodo de tiempo, con un adecuado y constante monitoreo del efluente. También se recomienda tomar en cuenta los estudios para el cumplimiento de la NOM-014-CONAGUA-2003 que incluye (análisis hidrogeoquímico, cumplir con los límites máximos permisibles en la calidad del agua de recarga que determine "La Comisión", para aquellos parámetros no regulados por la NOM-127-SSA1-1994, estudios toxicológicos y carcinogénicos).

## Generación de aguas residuales, el tratamiento y el uso a escala mundial

Tabla 14 Aguas Residuales generadas, Tratadas y utilizadas en América del Norte.

País	Agua residual generada		Agua residual tratada		Agua residual tratada en uso	
	Año de informe	Volumen (km <sup>3</sup> /año)	Año de informe	Volumen (km <sup>3</sup> /año)	Año de informe	Volumen (km <sup>3</sup> /año)
Canadá	2006	5.395 (a)	2006	4.477 (a)	-	N / A
Estados Unidos de América	1995	79.573 (b)	1995	56.642 (b)	2002	2.345 (c)

N/A se refiere a los datos no disponibles  
a Environment Canada (2010).  
b Solley et al. (1998).  
c USEPA (2004).

Tabla 15 Aguas residuales generadas, tratadas, y utilizadas en América Latina.

País	Agua residual generada		Agua residual tratada		Agua residual tratada en uso	
	Año de informe	Volumen (km <sup>3</sup> /año)	Año de informe	Volumen (km <sup>3</sup> /año)	Año de informe	Volumen (km <sup>3</sup> /año)
Antigua y Barbuda	-	N / A	1990	0.0002	-	N / A
Argentina	1997	3,530	2000	0,104	2000	0,091
Belice	1994	0,002	-	N / A	-	N / A
Bolivia	2001	0.135 (a)	1992	0,034	2008	0.016 (b)
Brasil	1996	2,567	1996	0,885	2008	0.009 (b)
Chile	2011	1.516 (c)	2001	0.048 (*)	2008	0,117 (*, b)
Colombia	2010	2.395 (d)	2010	0.597 (d)	-	N / A
Costa Rica	2000	0.086 (e)	2000	0,005	-	N / A
Cuba	1994	0,502	1994	0,109	-	N / A
República Dominicana	2011	0.427 (f)	2000	0,131	2000	0,019
Ecuador	1999	0.631 (e)	1999	0,158	-	N / A
El Salvador	2010	0,097 (g)	2010	0.001 (g)	-	N / A
Guatemala	1998	0,365	1994	0,006	2008	0.0005 (a)
México	2002	13,340	2005	3,110	2000	0,280
Nicaragua	1996	0,067	2000	0,007	2000	0,001
Panamá	1998	0,394	-	N / A	-	N / A
Paraguay	2000	0.009 (e)	-	N / A	-	N / A
Perú	2012	0.786 (h)	2012	0.275 (h)	2000	0,019
Venezuela	1996	2,903	-	N / A	-	N / A

NA se refiere a los datos no disponibles.  
a Seleccionados principales ciudades de Bolivia ( Marka, 2012 ).  
b Jiménez y Asano (2008a) .  
c Las aguas residuales domésticas ( Navarrete y Viches, 2012 ).  
d Gómez et al. (2012) .  
e Los valores se refieren a las aguas residuales domésticas solamente ( FAO, 2011 ).  
f Distrito Nacional y la Provincia Santo Domingo ( Pérez y Montás, 2012 ).  
g Las áreas metropolitanas de San Salvador ( Deras, 2012 ).  
h Las aguas residuales domésticas solamente ( Tong, 2012 ).  
\* Mayor volumen de uso de aguas residuales tratadas que el volumen de aguas residuales tratadas puede ser debido a los respectivos datos de diferentes años de referencia; volumen de aguas residuales tratadas informó desde 2001 y el volumen de aguas residuales tratadas utilizado informó desde 2008.

Tabla 16 Aguas residuales generadas, tratadas, y utilizadas en Europa.

País	Agua residual generada		Agua residual tratada		Agua residual tratada en uso	
	Año de informe	Volumen (km <sup>3</sup> /año)	Año de informe	Volumen (km <sup>3</sup> /año)	Año de informe	Volumen (km <sup>3</sup> /año)
Austria	2009	2.352 a	2006	1.061 a	-	N / A
Bélgica	2003	1.114 a	-	N / A	2000	0.003 b
Bosnia y Herzegovina	2011	0.065 c	2009	0.003 c	-	N / A
Bulgaria	2009	0.462 a	2007	0.387 a	-	N / A
Croacia	2011	0.343 d	2011	0.267 d	-	N / A
Chipre	2005	0.022 *	2007	0.245 *	2008	0,007
República Checa	2009	1.248 a	2010	0.871 e	-	N / A
Dinamarca	-	N / A	1998	0.802 a	-	N / A
Francia	2004	7.910 f	2004	6.654 f	2004	0.411 a
Alemania	2007	6.172 a	2007	5.213 a	2000	0.042 b
Grecia	-	N / A	2007	0,566	2000	0.023 b
Hungría	2004	4.162 a	2006	0.414 a	-	N / A
Irlanda	-	N / A	2007	0,290	-	N / A
Italia	2007	3,926	2007	3,902	2000	0.233 b
Luxemburgo	2003	0,090	2008	0,040	-	N / A
Malta	2009	0,020	2003	0,003	2000	0.002 b
Mónaco	2009	0.008 h	2009	0.006 h	-	N / A
Montenegro	2009	0.066 i	2009	0.015 i	-	N / A
Países Bajos	1991	1.651 *	2009	1,818 *, j	2000	0.008 b
Polonia	2009	2.198 a	2007	1.174 a	2000	0.003 b
Portugal	2009	0.577 k	2009	0.561 k	2000	0.001 b
Rumania	2009	5.120 a	2007	0.811 a	-	N / A
Serbia	2011	3.499 m	2011	0.189 n	-	N / A
Eslovaquia	2007	0.580 a	1998	0.484 a	-	N / A
Eslovenia	2010	0.173 o	2010	0.146 o	-	N / A
España	2007	5.204 p	2007	4.570 p	2007	0.487 p
Suecia	-	N / A	2006	0.539 a	-	N / A
Suiza	2005	1.441 a	-	N / A	-	N / A
Reino Unido	2002	4,019	2008	3,806	2008	0,164

NA se refiere a los datos no disponibles.

a EUROSTAT (2012).

b AQUAREC (2006).

c FOSFBH (2012).

d CROSTAT (2012).

e CSO (2012).

f FIE (2012).

g UNMIK (2003).

h PMDFEU (2009).

i MONSTAT (2010).

j Statistics Netherlands (2012).

k Área Continente solamente ( PNIR, 2010 ).

l Los valores se refieren a las aguas residuales industriales ( RMSSO, 2011 ).

m Puede incluir el agua de refrigeración. Extracto del agua para la refrigeración industrial es 3,327 kilómetros<sup>3</sup> por el año de 2011 ( SORS, 2012 ).

n SORS (2012).

o SORSi (2012).

p National Statistics Institute, Spain (2012)

Tabla 17 Aguas residuales generadas, tratadas, y utilizadas en Federación de Rusia y los Estados Independientes de la Unión Soviética.

País	Agua residual generada		Agua residual tratada		Agua residual tratada en uso	
	Año de informe	Volumen (km <sup>3</sup> /año)	Año de informe	Volumen (km <sup>3</sup> /año)	Año de informe	Volumen (km <sup>3</sup> /año)
Armenia	2011	0.750 a	2011	0.115 a	2006	0.0001
Azerbaiyán	2005	0,659	2005	0,161	2005	0,161
Bielorrusia	2010	0.990 b	2010	0.676 b	-	N / A
Estonia	2009	0.379 c	2007	0.104 c	-	N / A
Georgia	-	N / A	2005	0,009	-	N / A
Kazajistán	1993	1,833	1993	0,274	2000	0,274
Kirguistán	2006	0.701 d	2006	0.148 d	2000	0.0001
Letonia	2009	0.282 e	2009	0.128 e	2000	0,012
Lituania	2009	0.263 c	2007	0.161 c	1995	0,005
República de Moldova	2011	0.686 f	2011	0.122 f	-	N / A
Federación Rusa	2007	9,327 *, g	2002	14,000 *, h	-	N / A
Tayikistán	2008	0,092	2008	0,089	-	N / A
Turkmenistán	2010	1,275	2004	0,336	2004	0,336
Ucrania	2011	8.044 i	2011	1.763 i	-	N / A
Uzbekistán	2001	2.200 j	2001	2.069 j	1994	0,205

Salvo que se indique lo contrario, los datos son de la FAO-AQUASTAT (2012) . NA se refiere a los datos no disponibles.

a NSSRA (2012) .

b NSCRB (2011) .

c EUROSTAT (2012) .

d CEPE (2009) .

e Estrategia de país (2011) .

f Las cifras se incluyen como aguas residuales, la mía y las aguas de drenaje subterráneos ( NBSRM, 2012) .

g El valor se refiere al volumen estimado de las aguas residuales generadas por algunas actividades ( MNRERF, 2009) .

h DAES-DSD (2004) .

i SCSU (2012) .

j Los valores se refieren a las aguas residuales industriales que pueden incluir agua de refrigeración ( CEPE, 2001) .

\* Mayor volumen de aguas residuales tratadas que el volumen de las aguas residuales generadas pueden deberse a diferentes criterios utilizados por diferentes organizaciones en la definición de las aguas residuales y diferentes años de información.

Tabla 18 Aguas residuales generadas, tratadas, y utilizadas en Oriente Medio y África del Norte.

País	Agua residual generada		Agua residual tratada		Agua residual tratada en uso	
	Año de informe	Volumen (km <sup>3</sup> /año)	Año de informe	Volumen (km <sup>3</sup> /año)	Año de informe	Volumen (km <sup>3</sup> /año)
Argelia	2010	0,730	2010	0,150	-	N / A
Bahrein	2010	0,084	2005	0,062	2005	0,016
Egipto	2011	8,500	2011	4,800	2011	0,700
Corrí	2010	3.548 a	2010	0.821 a	2010	0,328
Irak	2012	0.580 b	2012	0.580 b	-	N / A
Israel	2007	0,500	2007	0,450	2004	0,262
Jordania	2008	0,180	2011	0,115 c	2012	0,108 c
Kuwait	2008	0,254	2005	0,250	2002	0,078
Libano	2003	0,310	2006	0,004	2005	0,002
Libia	1999	0,546	1999	0,040	2000	0,040
Marruecos	2010	0,700	2010	0,124	2008	0,070
Omán	2000	0,090	2006	0,037	2006	0,037
Territorios Palestinos	2001	0,071 d	2001	0,030 d	1998	0,010
Katar	2005	0,055 *	2006	0,058 *	2005	0,043
Arabia Saudita	2000	0,730	2002	0,548	2006	0,166
Siria	2002	1,364	2002	0,550	2003	0,550
Túnez	2010	0,246	2010	0,226 e	2001	0,021
Pavo	2010	3.582 f	2010	2.719 f	2006	1,000
Emiratos Árabes Unidos	1995	0,500	2006	0,289	2005	0,248
Yemen	2000	0,074	1999	0,046	2000	0,006

Salvo que se indique lo contrario, los datos son de la FAO-AQUASTAT (2012) . NA se refiere a los datos no disponibles.  
a Las aguas residuales domésticas solamente ( Tajrishy, 2012 ).  
b Aziz y Aws (2012) .  
c Ulimat (2012) .  
d PEDCAR (2001) .  
e Saloua (2012) .  
f TURKSTAT (2012) .  
\* Mayor volumen de aguas residuales tratadas que el volumen de las aguas residuales generadas puede ser debido a los respectivos datos de diferentes años de información.

Tabla 19 Aguas residuales generadas, tratadas, y utilizadas en África Sub-Saharan.

País	Agua residual generada		Agua residual tratada		Agua residual tratada en uso	
	Año de informe	Volumen (km <sup>3</sup> /año)	Año de informe	Volumen (km <sup>3</sup> /año)	Año de informe	Volumen (km <sup>3</sup> /año)
Botswana	2000	0,043	1999	0,008	-	N / A
Burkina Faso	2000	0,001	-	N / A	-	N / A
Costa de Marfil	-	N / A	1994	0	-	N / A
Djibouti	-	N / A	-	N / A	2000	0,0001
Eritrea	2000	0,018	-	N / A	-	N / A
Etiopía	2009	0,049 a	-	N / A	2009	0,009 a
Ghana	2006	0,280 b	2006	0,022 b	-	N / A
Lesoto	2012	0,007 c	-	N / A	-	N / A
Mauritania	-	N / A	1998	0,0007	2000	0,0007
Mauricio	-	N / A	2012	0,039 d	2006	0,015 d
Namibia	2012	0,013 e	-	N / A	2000	0,007
Senegal	2010	0,067 f	2010	0,015 g	2010	0,002 f
Seychelles	2003	0,009	2003	0,0009	2003	0,000006
Sudáfrica	2000	3,200	2000	3,200	2008	0,030 h
Swazilandia	2002	0,012	2002	0,009	-	N / A
Uganda	2012	0,008 i	-	N / A	-	N / A

NA se refiere a los datos no disponibles.  
a Ciudad Addis Abeba, capital de Etiopía ( Van Rooijen et al., 2010 ).  
b Las aguas residuales domésticas generadas en Ghana urbana ( Gyampo, 2012 ).  
c Lekhoana (2012) .  
d Joysury et al. (2012) .  
e Windhoek, capital de Namibia solamente ( Moyo, 2012 ).  
f Kayiizzi et al. (2012) .  
g Dakar only (Souare et al., 2012).  
h Jiménez y Asano (2008a) .  
i Souare et al. (2012) .

Tabla 20 Aguas residuales generadas, tratadas, y utilizadas en Oceanía.

País	Agua residual generada		Agua residual tratada		Agua residual tratada en uso	
	Año de informe	Volumen (km <sup>3</sup> /año)	Año de informe	Volumen (km <sup>3</sup> /año)	Año de informe	Volumen (km <sup>3</sup> /año)
Australia	2008	2.094 a	2008	1.779 a	2008	0.348 a
Nueva Zelanda	-	N / A	2012	0.548 b	-	N / A

NA se refiere a los datos no disponibles.  
a ABS (2010) .  
b Las aguas residuales domésticas en Nueva Zelanda ( MENZ, 2012 ).

Tabla 21 Aguas residuales generadas, tratadas, y utilizadas en Asia.

País	Agua residual generada		Agua residual tratada		Agua residual tratada en uso	
	Año de informe	Volumen (km <sup>3</sup> /año)	Año de informe	Volumen (km <sup>3</sup> /año)	Año de informe	Volumen (km <sup>3</sup> /año)
Bangladesh	2000	0.725 a	-	N / A	-	N / A
Bhután	2000	0.004	-	N / A	-	N / A
Camboya	2000	1.184 b	1994	0	-	N / A
China	2009	58.920 c	2006	17,890	2005	13,390
India	2012	13.999 d	2012	4.302 d	2000	0.450 e
Japón	2009	27.000 f	2009	14.650 f	2009	0.204 f
Laos	2000	0.546 b	-	N / A	-	N / A
Malasia	2000	1.403 a	1995	0,398	-	N / A
Maldivas	2000	0.004	-	N / A	-	N / A
Mongolia	2002	0,126 g	2002	0,083 g	-	N / A
Myanmar	2000	0.017 a	-	N / A	-	N / A
Nepal	2006	0.135 h	2006	0.006 h	-	N / A
Pakistán	2011	6.849 i	2011	0.548 j	-	N / A
Filipinas	2000	7.500 k	1993	0,010	-	N / A
República de Corea	2000	6.895 a	1996	4,180	2008	0.157 l
Singapur	2000	0.470 a	-	N / A	2008	0.027 l
Sri Lanka	2000	0.950 a	-	N / A	-	N / A
Tailandia	2008	5,293	1995	0,035	-	N / A
Viet Nam	2003	1,100	2009	0,070	2003	0,175

Salvo que se indique lo contrario, los datos son de la FAO-AQUASTAT (2012) .  
NA se refiere a los datos no disponibles.  
a ONU (2000) .  
b Los valores se refieren a las aguas residuales domésticas estimado teniendo en cuenta el consumo diario per cápita de agua (230 l) y la población total estimada en los países en 2000 ( Kamal et al., 2008 ).  
c MEPPRC (2012) .  
d Kaur et al. (2012) .  
e Shrivastava y Swarup (2001) .  
f Banco Mundial, 2012 y Banco Mundial, 2012 .  
g Basandorj (2002) .  
h Nyachhyon (2006) .  
i Murtaza (2012) .  
j Cálculo a partir de las estimaciones de alrededor del 8% de las aguas residuales generadas en Pakistán sufre tratamiento (Murtaza, 2012).  
k Los valores se refieren a las aguas residuales domésticas solamente ( ONU, 2000 ).  
l Jiménez y Asano (2008a) .

## Calidad de agua regulada por agencias Internacionales y Nacional

Tabla 22 Parámetros de calidad de agua regulados por agencias a nivel Internacionales y Nacional (COMPLETA).

Parámetro		Unidad	Estados Unidos (94 parámetros referidos)	Unión Europea (52 parámetros referidos)	Australia (97 parámetros referidos)	México (112 parámetros referidos)
Microbiológicos (12)	Organismos coliformes totales	NMP/100 mL	5%	0	0	Ausencia o no detectable
	Organismos coliformes fecales, E. coli u organismos termotolerantes	NMP/100 mL	Ausencia o no detectable	0	Ausencia o no detectable	Ausencia o no detectable
	Enterococos	NMP/100 mL	NE	0	NE	0
	<i>Legionella</i>	NMP/100 mL	NE	NE	Ausencia o no detectable	0
	<i>Giardia lamblia</i>	Quistes	99.9% Remoción	NE	NE	0
	<i>Cryptosporidium</i>	Quistes	99% Remoción	0	NE	0
	<i>Mycobacterium avium complex</i>	NMP/100 mL	NE	NE	NE	0
	<i>Aeromonas hydrophila</i>	NMP/100 mL	NE	NE	NE	0
	<i>Helicobacter pylori</i>	NMP/100 mL	NE	NE	NE	0
	Bacterias heterotróficas HPC	UFC/ mL	500	NE	NE	0
	Virus entéricos	UFC/100 mL	99.99% Remoción	NE	NE	0
	<i>Clostridium perfringens</i>	NMP/100 mL	NE	0	NE	NE
Organolépticos (2)	Color	Pt-Co	15	Agradable	15	20
	Olor y sabor		3 U O	Agradable	Agradable	Agradable
Fertilizantes (1)	Ácido nitrilotriacético	µg/L	NE	NE	0.2	NE
Fisicoquímicos (6)	Conductividad	(µS/cm a 20°C)	NE	2500	NE	NE
	pH		6.5-8.5	6.5 - 9.5	6.5-8.5	6.5-8.5
	SDT	mg/L	500	NE	600	1000
	Turbiedad	UTN	5	Agradable	5	5
	Corrosividad	-	No corrosivo	NE	NE	NE
	Oxidabilidad	mg/L O <sub>2</sub>	NE	5	NE	NE



Parámetro	Unidad	Estados Unidos (94 parámetros referidos)	Unión Europea (52 parámetros referidos)	Australia (97 parámetros referidos)	México (112 parámetros referidos)	
Inorgánicos(32)	Aluminio	mg/L	0.05 a 0.2	0.2	0.2	0.2
	Amonio	mg/L	NE	0.5	0.5	NE
	Antimonio	mg/L	0.006	0.005	0.003	0.006
	Arsénico	mg/L	0.01	0.01	0.01	0.05
	Asbesto	MF/L	7	NE	NE	7
	Bario	mg/L	2	3	2	0.7
	Berilio	mg/L	0.004	NE	0.06	0.004
	Boro	mg/L	NE	1	4	0.3
	Cadmio	mg/L	0.005	0.005	0.002	0.005
	Cianuros (como CN-)	mg/L	0.2	0.05	0.08	0.07
	Cloro residual libre	mg/L	NE	NE	NE	0.2-1.50
	Cloruros (como Cl-)	mg/L	250	250	250	250
	Cobre	mg/L	1.3	2	NE	2
	Cromo total	mg/L	0.1	0.05	0.05	0.05
	Fierro	mg/L	0.3	0.2	0.3	0.3
	Fluoruros (como F-)	mg/L	4	1.5	1.5	1.5
	Manganeso	mg/L	0.05	0.05	0.1	0.15
	Mercurio	mg/L	0.002	0.001	0.001	0.001
	Molibdeno	mg/L	NE	NE	0.05	NE
	Níquel	mg/L	NE	0.02	0.02	NE
	Nitratos (como N)	mg/L	10	11.3	NE	10
	Nitritos (como N)	mg/L	1	0.15	NE	1
	Nitrógeno amoniacal (como N)	mg/L	NE	NE	NE	0.5
	Plata	mg/L	0.1	NE	0.1	0.1
	Plomo	mg/L	0.015	0.01	0.01	0.01
	Selenio	mg/L	0.05	0.01	0.01	0.05
Sodio	mg/L	NE	200	180	200	
Sulfatos (como SO <sub>4</sub> -)	mg/L	250	250	250	400	

Parámetro		Unidad	Estados Unidos (94 parámetros referidos)	Unión Europea (52 parámetros referidos)	Australia (97 parámetros referidos)	México (112 parámetros referidos)
	Sulfuros (como H <sub>2</sub> S)	mg/L	NE	NE	NE	NE
	Talio	mg/L	0.002	NE	NE	NE
	Yodo residual libre	mg/L	NE	NE	NE	0.2 - 0.5
	Zinc	mg/L	5	NE	3	5
Orgánicos (56)	1,1 dicloroetileno	µg/L	7	NE	NE	7
	1,2-dibromoetano	µg/L	NE	NE	NE	NE
	1,2-diclorobenceno	µg/L	NE	NE	1.5	NE
	1,2-dicloroetano	µg/L	5	3	6	5
	1,2-dicloroetano	µg/L	NE	NE	NE	NE
	1,4-diclorobenceno	µg/L	NE	NE	40	NE
	1,2-Dicloropropano (1,2 DCP)	µg/L	5	NE	NE	5
	1,4-dioxano	µg/L	NE	NE	NE	NE
	1,1,1-tricloroetano	µg/L	200	NE	NE	200
	1,1,2-tricloroetano	µg/L	5	NE	NE	5
	1,2,4-triclorobenceno	µg/L	70	NE	5	70
	2,3,4,6-tetraclorofenol	µg/L	NE	NE	NE	NE
	Acido nítrilo acético	µg/L	NE	NE	NE	NE
	Acrilamida	µg/L	0.5	0.1	0.2	0.5
	Benceno	µg/L	5	1	1	10
	Benzopireno	µg/L	0.2	0.01	NE	0.2
Bifenilos policlorados	µg/L	0.5	NE	NE	0.5	

Parámetro	Unidad	Estados Unidos (94 parámetros referidos)	Unión Europea (52 parámetros referidos)	Australia (97 parámetros referidos)	México (112 parámetros referidos)
Carbón Orgánico Total (COT)	mg/L	NE	Sin cambios anómalos	NE	<1
Cis-1,2-dicloroetileno	µg/L	70	NE	NE	70
Clorobenceno	µg/L	100	NE	10	100
Cloruro de vinilo	µg/L	2	0.5	0.3	2
Cloruro de cianógeno	µg/L	NE	NE	80	NE
Di(2-etilhexil)adipato	µg/L	400	NE	10	400
Di(2-etilhexil)ftalato	µg/L	6	NE	NE	6
Dibromuro de etileno	µg/L	0.05	NE	NE	NE
Dicloroacetato	µg/L	NE	NE	NE	NE
Diclorometano	µg/L	5	NE	4	5
Dioxin (2,3,7,8-TCDD)	µg/L	0.000003	NE	NE	0.000003
Dureza total (como CaCO <sub>3</sub> )	µg/L	NE	NE	200000	500000
EDTA	µg/L	NE	NE	NE	NE
Epiclorhidrina	µg/L	NE	0.1	NE	NE
Estireno	µg/L	100	NE	4	20
Etilbenceno	µg/L	700	NE	300	300
Fenoles o compuestos fenólicos	µg/L	NE	NE	NE	300
Hexaclorobenceno	µg/L	1	NE	NE	1
Hexaclorobutadieno	µg/L	NE	NE	0.7	50
Hexaclorociclopentadieno	µg/L	50	NE	NE	NE
Hidrocarburos policíclicos aromáticos	µg/L	NE	0.1	NE	NE
Metil terbutil éter	µg/L	NE	NE	NE	30
Microcystin-LR	µg/L	NE	NE	NE	NE

Parámetro		Unidad	Estados Unidos (94 parámetros referidos)	Unión Europea (52 parámetros referidos)	Australia (97 parámetros referidos)	México (112 parámetros referidos)
	Monocloroacetato	µg/L	NE	NE	NE	NE
	o-diclorobenceno	µg/L	600	NE	NE	600
	p-diclorobenceno	µg/L	75	NE	NE	75
	Pyriproxyfen	µg/L	NE	NE	NE	NE
	SAAM	µg/L	500	NE	NE	500
	Terbutilazina	µg/L	NE	NE	0.01	NE
	Tetracloroetano	µg/L	NE	NE	50	NE
	Tetracloroetano y tricloroetano	µg/L	NE	10	NE	NE
	Tetracloroetileno	µg/L	5	NE	NE	5
	Tetracloruro de carbono	µg/L	5	NE	3	5
	Tolueno	µg/L	1,000	NE	25	700
	Trans-1,2-dicloroetileno	µg/L	100	NE	NE	100
	Tricloroacetato	µg/L	NE	NE	NE	NE
	Tricloroetano	µg/L	NE	NE	NE	NE
	Tricloroetileno	µg/L	5	NE	NE	5
	Xileno (tres isómeros)	µg/L	10,000	NE	20	500
Plaguicidas (58)	1,2-Dibromo-3-cloropropano (DBCP)	µg/L	0.2	NE	NE	1
	1,3-Dicloropropeno	µg/L	NE	NE	100	NE
	2,4 - D	µg/L	70	NE	30	30
	2,4-DB	µg/L	NE	NE	NE	NE
	2,4-Diclorofenol	µg/L	NE	NE	200	NE
	2,4,5-T	µg/L	NE	NE	NE	NE

Parámetro	Unidad	Estados Unidos (94 parámetros referidos)	Unión Europea (52 parámetros referidos)	Australia (97 parámetros referidos)	México (112 parámetros referidos)
2,4,5-TP (Silvex)	µg/L	50	NE	NE	50
Alaclor	µg/L	2	NE	NE	20
Aldicarb	µg/L	NE	NE	4	10
Aldrín y dieldrín	µg/L	NE	0.03	0.3	0.03
Atrazina	µg/L	3	NE	20	2
Azinfos-metil	µg/L	NE	NE	30	NE
Carbofuran	µg/L	40	NE	10	5
Cianazina	µg/L	NE	NE	NE	NE
Bendiocarb	µg/L	NE	NE	NE	NE
Borón	µg/L	NE	NE	NE	NE
Bromoxinil	µg/L	NE	NE	10	NE
Carbaril	µg/L	NE	NE	30	NE
Clordano (total de isómeros)	µg/L	2	NE	2	0.2
Clorotoluron	µg/L	NE	NE	NE	NE
Clorpirifos	µg/L	NE	NE	0.01	NE
Dalapon	µg/L	200	NE	NE	200
DDT (total de isómeros)	µg/L	NE	NE	9	1
Diazinón	µg/L	NE	NE	4	NE
Dicamba	µg/L	NE	NE	100	NE
Diclofop-Metil	µg/L	NE	NE	5	NE
Diclorprop	µg/L	NE	NE	100	NE
Dimetoato	µg/L	NE	NE	7	NE
Dinoseb	µg/L	7	NE	NE	NE
Diquat	µg/L	20	NE	7	20
Diuron	µg/L	NE	NE	20	NE
Endothall	µg/L	100	NE	100	100
Endrin	µg/L	2	NE	NE	2
Fenoprop	µg/L	NE	NE	NE	NE
Forato	µg/L	NE	NE	NE	NE
Glifosato	µg/L	700	NE	1000	700

Parámetro		Unidad	Estados Unidos (94 parámetros referidos)	Unión Europea (52 parámetros referidos)	Australia (97 parámetros referidos)	México (112 parámetros referidos)
	Monocloroacetato	µg/L	NE	NE	NE	NE
	o-diclorobenceno	µg/L	600	NE	NE	600
	p-diclorobenceno	µg/L	75	NE	NE	75
	Pyriproxyfen	µg/L	NE	NE	NE	NE
	SAAM	µg/L	500	NE	NE	500
	Terbutilazina	µg/L	NE	NE	0.01	NE
	Tetracloroetano	µg/L	NE	NE	50	NE
	Tetracloroetano y tricloroetano	µg/L	NE	10	NE	NE
	Tetracloroetileno	µg/L	5	NE	NE	5
	Tetracloruro de carbono	µg/L	5	NE	3	5
	Tolueno	µg/L	1,000	NE	25	700
	Trans-1,2-dicloroetileno	µg/L	100	NE	NE	100
	Tricloroacetato	µg/L	NE	NE	NE	NE
	Tricloroetano	µg/L	NE	NE	NE	NE
	Tricloroetileno	µg/L	5	NE	NE	5
	Xileno (tres isómeros)	µg/L	10,000	NE	20	500
Plaguicidas (58)	1,2-Dibromo-3-cloropropano (DBCP)	µg/L	0.2	NE	NE	1
	1,3-Dicloropropeno	µg/L	NE	NE	100	NE
	2,4 - D	µg/L	70	NE	30	30
	2,4-DB	µg/L	NE	NE	NE	NE
	2,4-Diclorofenol	µg/L	NE	NE	200	NE
	2,4,5-T	µg/L	NE	NE	NE	NE

Parámetro	Unidad	Estados Unidos (94 parámetros referidos)	Unión Europea (52 parámetros referidos)	Australia (97 parámetros referidos)	México (112 parámetros referidos)
2,4,5-TP (Silvex)	µg/L	50	NE	NE	50
Alaclor	µg/L	2	NE	NE	20
Aldicarb	µg/L	NE	NE	4	10
Aldrín y dieldrín	µg/L	NE	0.03	0.3	0.03
Atrazina	µg/L	3	NE	20	2
Azinfos-metil	µg/L	NE	NE	30	NE
Carbofuran	µg/L	40	NE	10	5
Cianazina	µg/L	NE	NE	NE	NE
Bendiocarb	µg/L	NE	NE	NE	NE
Borón	µg/L	NE	NE	NE	NE
Bromoxinil	µg/L	NE	NE	10	NE
Carbaril	µg/L	NE	NE	30	NE
Clordano (total de isómeros)	µg/L	2	NE	2	0.2
Clorotoluron	µg/L	NE	NE	NE	NE
Clorpirifos	µg/L	NE	NE	0.01	NE
Dalapon	µg/L	200	NE	NE	200
DDT (total de isómeros)	µg/L	NE	NE	9	1
Diazinón	µg/L	NE	NE	4	NE
Dicamba	µg/L	NE	NE	100	NE
Diclofop-Metil	µg/L	NE	NE	5	NE
Diclorprop	µg/L	NE	NE	100	NE
Dimetoato	µg/L	NE	NE	7	NE
Dinoseb	µg/L	7	NE	NE	NE
Diquat	µg/L	20	NE	7	20
Diuron	µg/L	NE	NE	20	NE
Endothall	µg/L	100	NE	100	100
Endrin	µg/L	2	NE	NE	2
Fenoprop	µg/L	NE	NE	NE	NE
Forato	µg/L	NE	NE	NE	NE
Glifosato	µg/L	700	NE	1000	700

Parámetro		Unidad	Estados Unidos (94 parámetros referidos)	Unión Europea (52 parámetros referidos)	Australia (97 parámetros referidos)	México (112 parámetros referidos)
Subproductos de la desinfección (15)	2,4,6-triclorofenol	mg/L	NE	NE	0.02	NE
	Ácido dicloroacético	mg/L	NE	NE	0.1	NE
	Ácidos haloacéticos	mg/L	0.06	NE	NE	0.06
	Ácido tricloroacético	mg/L	NE	NE	0.1	NE
	Bromato	mg/L	0.01	0.01	0.02	0.01
	Bromodichlorometano	mg/L	NE	NE	NE	NE
	Bromoformo	mg/L	NE	NE	NE	NE
	Cloraminas (como Cl <sub>2</sub> )	mg/L	4	NE	NE	0
	Clorato	mg/L	NE	NE	NE	NE
	Clorito	mg/L	1	NE	NE	1
	Cloroformo	mg/L	NE	NE	0.25	NE
	Dibromoacetoniitrilo	mg/L	NE	NE	NE	NE
	Dibromoclorometano	mg/L	NE	NE	NE	NE
	Dicloroacetoniitrilo	mg/L	NE	NE	NE	NE
	Trihalometanos totales	mg/L	0.08	0.1	NE	0.2
Radiactivos (11)	Radiactividad alfa global	Bq/L	NE	NE	NE	0.56
	Radiactividad beta global	Bq/L	NE	NE	NE	1.85
	Partículas alfa	pCi/L	15	NE	NE	NE
	Partículas beta y emisores fotón	mrems/año	4	NE	NE	NE
	Dosis indicativa total	mSv/año	NE	0.1	NE	NE
	Tritio	Bq/L	NE	100	NE	NE
	Cesio	Bq/L	NE	NE	NE	NE
	Yodo	Bq/L	NE	NE	NE	NE
	Estroncio	Bq/L	NE	NE	NE	NE
	Radio 226 y 228 combinados	pCi/L	5	NE	NE	5
	Uranio	mg/L	0.03	NE	0.017	30



## REFERENCIAS

- Adriana Palma Nava, Angélica Mata Mendoza, Carlos Villanueva Cruickshank, Fernando Villarreal González, Marco Antonio Salas Salinas, Rafael Segura Val, *Inventario de la Recarga Artificial de Acuíferos en México*, Memorias del Congreso Nacional de Hidráulica, México, 2014.
- Australian Bureau of Statistics (ABS), 2010. *Water Account Australia 2008–2009*.
- Bixio, D., De heyder, B., Cikurel, H., Muston, M., Miska, V., Joksimovic, D., Schäfer, A.I., Ravazzini, A., Aharoni, A., Savic, D., Thoeye, C., 2005. *Municipal wastewater reclamation: where do we stand? An overview of treatment technology and management practice*. *Water Science and Technology: Water Supply* 15, 77–85.
- Chávez A., Barrios J., Navarro I., Becerril J., Maya C., Soledad E., *Identificación de proyectos y obras de infraestructura para recarga natural y artificial, directa o indirecta, de acuíferos con agua pluvial y residual tratada* proyecto realizado por el Instituto de Ingeniería para la CONAGUA, 2015. Número de convenio 027, páginas 323.
- CONAGUA, 2014a. *Situación del subsector agua potable, drenaje y saneamiento*, edición 2014.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations, “Water Sector Policy Review and Strategy Formulation: A general framework”, Italia, 1995, FAO, pp 72-73.
- NOM-014-CONAGUA-2003. *Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada*.
- OECD (2012), *OECD Environmental Outlook to 2050*, OECD Publishing. <http://dx.doi.org/10.1787/9789264122246-en>
- Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD), 2008. *OECD Environmental data: Compendium 2006–2008*. <http://www.oecd.org/dataoecd/22/55/41878136.pdf>
- PNUMA-GEMS. *Programa del Agua Water Quality Outlook*. PNUMA Sistema Mundial de Vigilancia del Medio Ambiente, Programa del Agua, Instituto Nacional de Investigación sobre el Agua. Burlington, Ontario. 2007.
- Sato, T., Qadir, M., Yamamoto, S., Endo, T., y Zahoor, A.. (2013). *Global, regional, and country level need for data on wastewater generation, treatment, and use*. 2014, de AgriculturalWaterManagement Sitio web: [https://www.researchgate.net/publication/259128577\\_Global\\_regional\\_and\\_country\\_level\\_need\\_for\\_data\\_on\\_wastewater\\_generation\\_treatment\\_and\\_use\\_Agric\\_Water\\_Manag](https://www.researchgate.net/publication/259128577_Global_regional_and_country_level_need_for_data_on_wastewater_generation_treatment_and_use_Agric_Water_Manag).
- UNEP, *Vital Water Graphics: An Overview of the State of the World’s Fresh and Marine Water*, 2nd ed., United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya, 2008, <http://www.unep.org/dewa/vitalwater/index.html>.
- United Nations (UN), 2000. *Wastewater management policies and practices in Asia And the Pacific*, Water Resources Series No 79, UNESCAP, Bangkok.
- *Water Environment Partnership in Asia (WEPA)*, Institute for Global Environmental Strategies Ministry of the Environment, Japan (IGES), 2012.
- *WEPA Outlook on water environmental management in Asia 2012*. <http://www.wepa-db.net/pdf/1203outlook/01.pdf> (acceso 21.11.15).
- WHO, 2008. *The Global Burden of Disease: 2004 Update*. WHO, Geneva.

- WHO, United Nations Children's Fund (UNICEF), 2012. Joint Monitoring Programme (JMP) for water supply and sanitation. <http://www.wssinfo.org/data-estimates/table>.
- World Health Organization (WHO), 2007. *Diarrhea: Why Children are still Dying and What can be Done*. WHO, Geneva.
- World Health Organization and UNICEF. (2005). *Water for life making it happen*. Suiza: WHO.
- World Meteorological Organization (WMO), Geneva, 1996; *Global Environmental Outlook 2000 (GEO)*.
- WWAP (United Nations World Water Assessment Programme). 2015. *The United Nations World Water Development Report 2015: Water for a Sustainable World*. Paris, UNESCO.
- Committee to Evaluate the Viability of Augmenting Potable Water Supplies with Reclaimed Water, Commission on Geosciences, Environment and Resources, Division on Earth and Life Studies, National Research Council. (1998). *Issues in Potable Reuse: The Viability of Augmenting Drinking Water Supplies with Reclaimed Water*. Washington, D.C: National Academies Press.
- Conagua, Semarnat. *Estadísticas del Agua en México. Edición 2013*. México. 2014.
- Equipo investigador del proyecto I+D+i DINA-MAR, "La gestión de la recarga artificial de acuíferos en el marco del desarrollo sostenible, desarrollo tecnológico", Título 6, España, Hidrogeología Hoy, 2010.
- Ian Gale, Peter Dillon, "Strategies for Aquifer Recharge (MAR) in semi-arid areas" Francia, UNESCO International Hydrological Programme, 2005.
- Organización de las Naciones Unidas, "Gestión Integrada de Recursos Hídricos" 2009. en <http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/iwrm.shtml>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. *Programa Nacional Hídrico 2014-2018*. 2014, de Diario Oficial de la Federación Sitio web: [http://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5339732&fecha=08/04/2014](http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5339732&fecha=08/04/2014)
- UN International Network for Capacity Building in IWRM, Groundwater Management in IWRM. Pretoria, 2010.
- DIRECTIVA 2006/118/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO.» Diario Oficial de la Unión Europea, 27 de 12 de 2006.
- Directiva Marco del Agua Unión Europea. «DIRECTIVA 98/83/CE DEL CONSEJO.» Diario Oficial de las Comunidades Europeas, 5 de 12 de 1998.
- Environmental Protection Agency, "Guidelines for water reuse", Estados Unidos de América, EPA, 1992.
- Environmental Protection Agency, "Guidelines for water reuse", Estados Unidos de América, EPA, 2004
- Environmental Protection Agency, "U.S. National Primary Drinking Water Regulations", 2009 en <http://www.epa.gov/safewater/consumer/pdf/mcl.pdf>.
- Natural Resource Management Ministerial Council, "Australian Drinking Water Guidelines 6", Australia, 2011 en [https://www.clearwater.asn.au/userdata/resource-files/Aust\\_drinking\\_water\\_guidelines.pdf](https://www.clearwater.asn.au/userdata/resource-files/Aust_drinking_water_guidelines.pdf)
- NOM-014-CONAGUA-2003. Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada.
- NOM-015-CONAGUA-2007. Infiltración artificial de agua a los acuíferos. Características y especificaciones de las obras y del agua.
- NOM-127-SSA1-1994. Salud ambiental, agua para uso y consumo humano- Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.

- Orange Country Water District. *Groundwater replenishment system*. Estados Unidos de América, 2015, Sitio web: <http://www.ocwd.com/>
- National Research Council, *Ground Water Recharge Using Waters of Impaired Quality* Estados Unidos de América, NRC, 1994.
- WBMWD. Annual report; West Basin Municipal Water District: California, USA, 2006.
- Lazarova, V., Asano, T., Bahri, A., Anderson, J.. (2013). *Milestones in Water Reuse: The Best Success Stories*. London and New York: IWA Publishing.
- Günter Lempert, “Case study: New Goreangab water reclamation plant in Windhoek, Namibia”, Namibia, 2007; pp. 10.
- Lempert, G. Case study: New Goreangab water reclamation plant in Windhoek, Namibia. Goreangab Water Reclamation Plant: Windhoek, Namibia, 2007; p. 10.
- Haarhoff, J.; Merwe, B.V.D. Twenty-five years of wastewater reclamation in Windhoek, Namibia. *Water Sci. Technol.* 1996, 33, 25-35.
- Declan Page, Peter Dillon, Joanne Vanderzal., Elise Bekele, Karen Barry, Konrad Miotlinksi & Kerry Levett, “Managed aquifer recharge case study risk assessments”, Australia, National Water Commission, 2010.
- Peter Dillon, “Future management of aquifer recharge”, *Hydrogeology Journal* #13, Australia, 2005, pp. 313-316.
- Fernández E., *Gestión de la recarga de acuíferos como práctica alternativa de gestión hídrica*. Proyecto DINA– MAR, Grupo Tragsa, España. 2012.
- Tchobanoglous, G., Louis, Stensel H., Metcalf & Eddy. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. New York: McGraw-Hill Education.
- Committee on the Assessment of Water Reuse as an Approach to Meeting Future Water Supply Needs, Water Science and Technology Board, Division on Earth and Life Studies, National Research Council. (2012). *Water Reuse: Potential for Expanding the Nation's Water Supply Through Reuse of Municipal Wastewater*. Washington, D.C.: National Academies Press.