



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA AMBIENTAL – AGUA

**Potabilización de Fuentes no Convencionales con Procesos
Avanzados**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:

Meneses Aranda José Francisco

TUTOR PRINCIPAL:

M en C. MARÍA INÉS JOSEFINA NAVARRO GONZÁLEZ,
INSTITUTO DE INGENIERÍA

COMITÉ TUTORAL:

DRA. MARÍA TERESA ORTA LEDESMA, INSTITUTO DE INGENIERÍA
DRA. ANA ELISA SILVA MARTÍNEZ, FACULTAD DE INGENIERÍA

MÉXICO, CIUDAD DE MÉXICO, NOVIEMBRE 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dra. María Teresa Orta Ledesma

Secretario: Dra. Ana Elisa Silva Martínez

Vocal 1: M.I. Alba Beatriz Vázquez González

Vocal 2: M.I. Rodrigo T. Sepúlveda Hirose

Vocal 3: M.C. Inés Navarro González

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Instituto de Ingeniería, UNAM

TUTOR DE TESIS

M en C. MA. INÉS JOSEFINA NAVARRO GONZÁLEZ

FIRMA

DEDICATORIA

A mi familia, Miriam, Paty y Juan, por ayudarme a cumplir todos mis sueños.

La ciencia es una sola luz, e iluminar con ella cualquier parte,
es iluminar con ella el mundo entero.

Isaac Asimov

AGRADECIMIENTOS

A la Maestra Inés por ser mi guía y consejera, por siempre motivarme a ser mejor en todos los aspectos.

Al grupo de trabajo, Dra. Alma, Dr. José Antonio, Maestra Catalina Maya y Soledad.

A los sinodales integrantes del comité, Dra. Ana Elisa, Dra. Tere, Maestra Alba y el Maestro Rodrigo por sus observaciones e invaluable consejos para la correcta elaboración de este proyecto.

A mis compañeros y amigos de generación y grupo de trabajo.

A la flor de mi corazón.

A la mujer de ojos verdes de una hermosura maligna.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por el apoyo económico brindado para la realización de mis estudios de maestría.

A la Universidad Nacional Autónoma de México.

Al Instituto de Ingeniería-UNAM y al Laboratorio de Ingeniería Ambiental y todo su personal.

El trabajo experimental fue realizado en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería de la UNAM que cuenta con certificado de conformidad otorgado por el organismo acreditado Certificación Mexicana, S.C., por haber implementado y mantener un Sistema de Gestión de la Calidad de conformidad con los requisitos de la norma internacional ISO 9001:2015

No. de Certificado CMX C SGC 155 2017, válido en el período del

09 de noviembre de 2017 al 09 de noviembre de 2020



RESUMEN

La escasez de agua es un problema que crece año con año, actualmente se estima que afecta a cerca de un 40% de la población mundial. En México con aproximadamente un 60% del volumen proporcionado, la fuente subterránea es la predominante para abastecimiento público. A pesar de que a nivel nacional se extrae alrededor del 34% del volumen estimado de recarga anual, a nivel regional la situación es diferente. En las regiones administrativas Cuencas Centrales del Norte y Golfo Norte la extracción excede a la recarga en más del 10%, mientras que en la Península de Yucatán y la Frontera Sur, es menor a 6% del volumen total de recarga. En 2015, 106 acuíferos estaban sobreexplotados y 17 acuíferos costeros presentaban intrusión salina. El uso racional del agua subterránea es indispensable, ya que en el futuro cada vez más regiones dependerán de la reserva en el subsuelo como su principal fuente de agua.

En este estudio se evaluó la factibilidad de potabilizar dos fuentes de agua subterránea que tienen infiltraciones de agua residual y que actualmente no reciben el tratamiento adecuado. Para ello se utilizaron procesos avanzados combinados de manera diferente en tres trenes de tratamiento en una planta piloto. Las pruebas experimentales consistieron en hacer pasar muestras extraídas de las dos fuentes por los diferentes trenes de tratamiento. El prototipo permite tomar muestras a la salida de cada uno de los procesos, esto facilitó la evaluación del desempeño de los trenes de tratamiento, pudiendo realizar análisis de la calidad del efluente en distintos puntos.

Como resultado de las pruebas experimentales se encontró que el efluente del tren de tratamiento compuesto por arena/grava, zeolita y carbón activado en el primer módulo para la fuente 1, cumple con la NOM-127- SSA1-1994, mientras que el intercambio de zeolita por resina de intercambio iónico fue necesario para que el efluente de la fuente 2 cumpliera con dicha norma. Finalmente de esta investigación se concluye que el reúso de agua de ambas fuentes para consumo humano es factible, lo cual en un futuro podría significar una explotación del recurso hídrico de manera sustentable.

ABSTRACT

The lack of water is a problem that grows each year, it is estimated that currently affects near 40% of the world population. In Mexico with approximately 60% of the total volume provided, the underground source is the uppermost for public supplying. Despite that in a national level it is extracted about 34% of the estimated annual recharge volume. On a regional level, the situation is different. In the administrative regions “Cuencas Centrales del Norte” and “Golfo del Norte” the extraction exceeds the recharge in more than 10%. In contrast, in the Yucatán peninsula and in the south border, it is less than the 6% of the total recharge volume. In 2015, 106 aquifers were overexploited, and 17 coastal aquifers showed saline intrusion. The rational use of the underground water is essential, since in the near future more regions will depend of the subsoil reserve as its main water source.

In this research, it was evaluated the feasibility of purify two underground water sources that have wastewater infiltrations and currently they don't receive the appropriate treatment. For that, advanced processes were used combined in three different treatment trains fitted in a pilot plant. The experimental tests consisted in pass off water samples from the two sources through the different treatment trains. This prototype allows to take samples at the exit of each one of the processes, this facilitated the evaluation of the treatment performance, allowing to perform analysis of the effluent at different points.

As a result of this tests, it was found that the effluent of the gravel/sand, zeolite and activated carbon from the first module of treatment for source 1 fulfils the NOM-127- SSA1-1994, while the interchange of zeolite for the ion exchange resin was necessary to effluent from source 2 accomplished with the same norm. Finally, form this research, it can be concluded that the water reuse of both sources for human consumption is achievable, which, in the future could mean a sustainable way for the exploitation of the hydric resource.

Índice

	Página
1.- Introducción	1
1.1 Justificación	1
1.2 Hipótesis	4
1.3 Objetivos	4
1.4 Alcances	4
1.5 Resultados esperados	5
2.- Disponibilidad del agua para consumo humano en México	6
2.1 Agua subterránea y el abastecimiento público	8
2.2 Grado de presión sobre el recurso	11
2.3 Cobertura de agua potable	11
3.- Marco teórico	13
3.1 Reúso potable de agua residual	13
3.2 Casos de reúso emblemáticos	15
3.3 Resumen de los casos emblemáticos	27
3.4 Revisión de procesos	29
3.5 Monitoreo y calidad del agua	30
4.- Método experimental	33
4.1 Antecedentes de esta investigación	33
4.2 Sitios de estudio	36
4.2.1 El Valle del Mezquital, Manantial Cerro Colorado	37
4.2.2 Caudal a la potabilizadora La Caldera, Iztapalapa	40
4.3 Parámetros de control de proceso	45

4.3.1 Pruebas preliminares	47
4.3.2 Trenes de tratamiento propuestos	48
4.4 Diseño experimental	49
4.4.1 Selección del tratamiento óptimo	51
4.4.2 Muestreo	52
4.4.3 Análisis de muestras	53
5.- Resultados y discusión	55
5.1 Manantial de Cerro Colorado	55
5.2 Caudal a la potabilizadora La Caldera, Iztapalapa	59
6.- Conclusiones y recomendaciones	69
Bibliografía	
Anexos	

Índice de figuras

Figura 1.1 Componentes de un sistema de barreras múltiples	3
Figura 2.1 Distribución del agua renovable per cápita	6
Figura 2.2 Regiones que presentan sequía	8
Figura 2.3 Volumen concesionado para usos consuntivos	9
Figura 2.4 Evolución de usos consuntivos por municipio	9
Figura 2.5 Volumen concesionado de uso agrupado por tipo de fuente	10
Figura 2.6 Disponibilidad de acuíferos en México	10
Figura 2.7 Grado de presión sobre el recurso hídrico	11
Figura 2.8 Evolución de la población rural y urbana con agua potable	12
Figura 3.1 Diagramas de flujo Planta de Recuperación de Agua de Goreanbag	17
Figura 3.2 Diagrama del sistema de la Pure Cycle Corporation	18
Figura 3.3 Diagrama de proceso de la planta de demostración de Denver	19
Figura 3.4 Diagrama de proceso Estación Espacial Internacional (A)	20
Figura 3.5 Diagrama de proceso Estación Espacial Internacional (B)	21
Figura 3.6 Esquema de Cloudcroft	22
Figura 3.7 Esquema de Big Springs	23
Figura 3.8 Esquema del tratamiento en el Condado de Orange	24

Figura 3.9 Tren de tratamiento de multibarreras en Singapur	25
Figura 3.10 Localización de los puntos de muestra	32
Figura 4.1 Prototipo de potabilización	34
Figura 4.2 Tren de tratamiento del prototipo (T1)	34
Figura 4.3 Tipos de fuente de agua para abastecimiento	37
Figura 4.4 Valle del Mezquital en el estado de Hidalgo	39
Figura 4.5 Sección hidrogeológica a través de la planicie de Chalco	41
Figura 4.6 Ubicación de 14 pozos de sistema Mixquic-Santa Catarina	42
Figura 4.7 Ubicación de la potabilizadora “La Caldera”	42
Figura 4.8 Filtros a presión de arena y CA	44
Figura 4.9 Tren de tratamiento potabilizadora “La Caldera”	44
Figura 4.10 Tren de tratamiento acoplado resina intercambio iónico (T2)	48
Figura 4.11 Tren de tratamiento acoplado arena verde y resina (T3)	49
Figura 4.12 Diagrama de flujo del proceso de experimentación	54
Figura 5.1 Tren de tratamiento del prototipo (T1)	56
Figura 5.2 Comparación de las eficiencias de remoción trenes	61
Figura 5.3 Eficiencias de remoción en cada una de las etapas	63

Índice de tablas

	Página
Tabla 2.1 Recarga media total de acuíferos por zona hidrológica	7
Tabla 3.1 Resumen de algunas características de los casos emblemáticos	27
Tabla 3.2 Resumen de procesos utilizados	28
Tabla 3.1 Resumen de las eficiencias de remoción reportadas	29
Tabla 4.1 Eficiencias de remoción globales antecedentes	35
Tabla 4.2 Eficiencias de remoción por proceso de tratamiento	36
Tabla 4.3 Calidad del agua cruda de los emisores Central y del Poniente	40
Tabla 4.4 Características de la PP La Caldera	43
Tabla 4.5 Diseño experimental primera etapa	50
Tabla 4.6 Diseño experimental segunda etapa	52
Tabla 4.7 Técnicas utilizadas para la determinación de parámetros	53
Tabla 5.1 Resumen de los parámetros que exceden la NOM-127-SSA1	55
Tabla 5.2 Comparación de parámetros, influente, efluente y límites	55
Tabla 5.3 Resultados del tratamiento de agua real proveniente M.C.C	57
Tabla 5.4 Eficiencias de remoción promedio	58
Tabla 5.5 Comparación de las eficiencias de remoción globales	59

Tabla 5.6 Parámetros de interés en la Fuente 2	60
Tabla 5.7 Resultados de la primera réplica a la salida de cada etapa	61
Tabla 5.8 Eficiencias de remoción (%) por etapa 1ra réplica	62
Tabla 5.9 Balance de contaminantes en el tren de tratamiento T2	64
Tabla 5.10 Eficiencias de remoción (%)	64
Tabla 5.11 Valores promedio, coeficiente de variación y eficiencia global	65
Tabla 5.12 Comparación de parámetros en común	66

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación plantea la hipótesis de que el agua residual pueda ser reutilizada como fuente de agua potable en el futuro cercano si se le aplica un tratamiento adecuado. La implementación del reúso potable requerirá del esfuerzo conjunto de la tecnología de tratamiento aplicada y de la vigilancia y control para siempre producir agua que sea segura y aceptable para consumo humano. Este enfoque implica, además, el diseño de un sistema de recolección, tratamiento, purificación y distribución que tendría el beneficio de proveer al organismo operador de una mayor flexibilidad en caso de la disminución o falta de agua proveniente de las fuentes naturales.

1.1 Justificación

Como resultado del crecimiento de la población, de la urbanización y del cambio climático, las fuentes de abastecimiento de agua cada vez son más insuficientes, y las oportunidades de encontrar nuevas fuentes cercanas a áreas conurbadas son limitadas. Como consecuencia, las fuentes de abastecimiento de agua existentes deben de ser mayormente aprovechadas, por ejemplo, las fuentes de agua no convencionales como los manantiales que brotan a consecuencia de la formación de acuíferos por riego de agua residual las cuales no son aprovechadas.

Una forma de cumplir dicho objetivo es impulsar la práctica del reúso de agua residual para proteger las fuentes de abastecimiento municipales.

Uno de los principales problemas que se presentan hoy en día es el elevado costo de enviar agua desde lugares lejanos a las zonas urbanas; una posible solución al problema de la escasez de agua es desarrollar planes para el reúso potable directo (RPD) de agua residual tratada y conducir agua segura hacia el sistema de distribución de agua municipal. El RPD consiste en la introducción de agua purificada extraída del sistema de agua residual municipal, la cual fue tratada exhaustivamente y monitoreada para asegurarse que cumple con todos los requerimientos y normas de calidad, y conducirla directamente a los sistemas de abastecimiento municipales (Leverenz et al., 2011). Otra forma de reúso de agua es el reúso potable indirecto (RPI) que consiste en infiltraciones o inyecciones de agua residual tratada a mantos de agua subterránea que posteriormente serán utilizados por el sistema de abastecimiento municipal. Dentro de esta categoría se presenta el reúso planeado a través del cual se tiene la certeza de la calidad del agua que se mezcla con el agua subterránea, y el reúso no planeado que ocurre cuando el agua residual sin tratamiento se infiltra y serán los procesos naturales a través del subsuelo los que determinan la calidad del agua que llega

al manto subterráneo. Este último caso, se identifica como fuente de abastecimiento no convencional y es necesario evaluar el tratamiento de potabilización apropiado.

La escasez de agua dulce limpia es un problema que se está presentando en todo el planeta, ya sea por problemas de contaminación, por periodos de sequía o por el cambio climático. Para enfrentar esta problemática algunos países desarrollados actualmente cuentan con sistemas de reúso para recarga de acuíferos, para uso en la agricultura e inclusive para la distribución a la población ya que se están dando cuenta de todos los beneficios que aporta. En México es deseable empezar a desarrollar este tipo de tecnologías, puesto que hay varias zonas del país que por sobrepoblación o sequías o sobreexplotación de las fuentes de agua, entre otras causas, sus habitantes tienen acceso limitado al agua.

Antecedentes de esta investigación

El Valle de Tula recibe agua residual cruda de la Ciudad de México para riego agrícola, la mitad de ésta se infiltra a los acuíferos de los cuales el agua potable es extraída. Anteriormente se desarrolló un prototipo para potabilizar muestras de agua preparadas que simulaban las características del agua proveniente de estos acuíferos. El prototipo consta de tres sistemas de tratamiento:

- El primer sistema de pretratamiento está formado por tres filtros: el primero de grava y arena, el segundo de zeolita y el tercero de carbón activado.
- El segundo sistema de pretratamiento se integra de 2 módulos uno para retener sedimentos y otro de carbón activado y un módulo de ultrafiltración.
- El tercer sistema de tratamiento avanzado consta de una membrana de ósmosis inversa y de un filtro de carbón activado.
- El cuarto sistema es una etapa de oxidación con ozono de materia orgánica.

En investigaciones anteriores se determinó la eficiencia de remoción de cada una de las barreras utilizando muestras preparadas en el laboratorio que emulaban las condiciones reales del agua proveniente del Valle del Mezquital, con el objetivo de evaluar la reducción del riesgo a la salud en cada etapa del tratamiento. Unas de las recomendaciones más importantes de esa investigación fueron la operación del prototipo como barreras múltiples en muestras reales de agua.

Esta investigación tuvo como propósito probar el prototipo en muestras reales de fuentes de agua no convencionales.

Barreras múltiples

El objetivo de un sistema de barreras múltiples es i) reducir el riesgo de suministrar a la población agua contaminada y ii) de incrementar la confiabilidad y la efectividad de los procesos de potabilización. La meta principal es proteger la salud de la población.

En la figura 1.1 se presenta un esquema del funcionamiento de las barreras múltiples. El sistema de potabilización de agua contiene tres elementos principales: la fuente de agua, el tratamiento de potabilización y el sistema de distribución (Committee on Drinking Water, 2004). Estos elementos son administrados e integrados utilizando procedimientos y herramientas como:

- Monitoreo de la calidad del agua y manejo de las fuentes de abastecimiento desde su extracción hasta uso como agua potable
- Marcos de referencia legislativos
- Participación y concientización del público en general
- Manuales y guías para el usuario, estandarización y objetivos claros
- Investigación y desarrollo de ciencia y tecnología

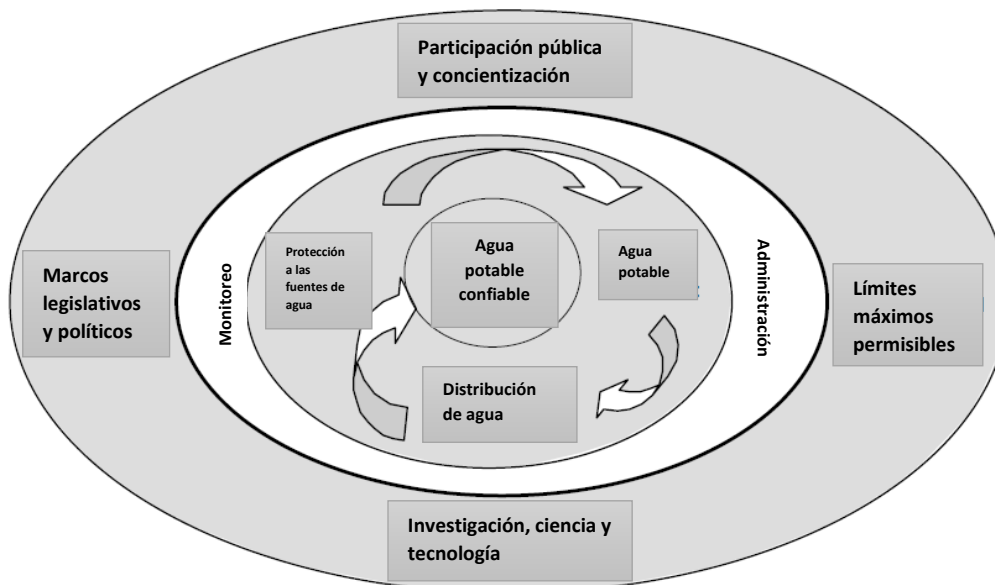


Figura 1.1 Componentes de un sistema de barreras múltiples (Committee on Drinking Water, 2004).

Un enfoque a través de barreras múltiples permite establecer parámetros de control definidos, así como sus límites tolerables. Las barreras son físicas, tales como la instalación de un sistema de filtración en una planta de tratamiento de agua potable, otras son procesos o herramientas que mejoren el manejo de un programa de tratamiento. Algunos ejemplos de lo segundo incluyen legislación y normatividad, programas de estandarización y manuales, capacitación de personal y educación y estrategias de información que el personal pueda usar para comunicarse con la sociedad.

1.2 Hipótesis

- El agua procedente de dos fuentes no convencionales tratadas con procesos avanzados tendrá la calidad de agua potable.
- La sustitución de arena/grava y zeolita por arena verde y resina de intercambio iónico en la primera etapa de pretratamiento de la planta piloto resultarán en una mayor eficiencia de tratamiento.

1.3 Objetivos

Objetivo General

- Potabilizar agua de dos fuentes no convencionales, Manantial de Cerro Colorado y el caudal a la planta potabilizadora La Caldera, utilizando procesos avanzados a escala piloto.

Objetivos específicos

1. Realizar pruebas piloto en el laboratorio con muestras de agua provenientes de cada una de las fuentes seleccionadas para evaluar la operación de los procesos avanzados y definir los parámetros de control y de evaluación.
2. Evaluar la eficiencia de la planta piloto al intercambiar arena/grava y zeolita por arena verde y resina de intercambio iónico.
3. Definir trenes de tratamiento específicos de acuerdo a las características de cada una de las fuentes a fin de cumplir con la normatividad vigente en materia de agua potable.

1.4 Alcances:

- Las fuentes no convencionales se seleccionaron de acuerdo a su composición fisicoquímica y a su ubicación geográfica para ser utilizadas en un futuro como fuente de abastecimiento.
- El trabajo experimental inicia con muestras recolectadas en el sitio estudio, para i) la evaluación preliminar de las variables del experimento, evaluar el concentrado del rechazo, la calidad del efluente, y la eficiencia de cada una de las etapas de tratamiento, ii) identificar si es necesario incluir algún proceso adicional al prototipo y iii) elaborar el diseño del experimento para las pruebas piloto.
- El trabajo experimental se realiza a nivel laboratorio para la operación en continuo del prototipo de acuerdo al diseño del experimento
- El trabajo experimental no incluye las etapas de desinfección y carbonatación necesarias para el ingreso del agua a una red de distribución

- Tampoco incluye el tratamiento del rechazo del proceso de ósmosis inversa, pero sí su caracterización
- Los principales parámetros de referencia para determinar la calidad del afluente como apto para consumo humano son los establecidos en la NOM-127- SSA1-1994

1.5 Resultados esperados

- Establecer la combinación de operación de los procesos del tren de tratamiento del prototipo como procesos avanzados que permitan obtener agua apta para consumo humano
- Identificación de los puntos de control para la supervisión de la operación de las etapas de tratamiento

CAPÍTULO 2. DISPONIBILIDAD DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO EN MÉXICO

Para fines de administración y preservación de los recursos de agua nacionales, el país se ha dividido en trece Regiones Hidrológicas Administrativas (RHA), las cuales están formadas por agrupaciones de cuencas, consideradas las unidades básicas de gestión de los recursos hídricos (CONAGUA, 2015). La figura 2.1 presenta la distribución de agua renovable per cápita en el 2014, en ella se observa la división del país en dos partes: el sureste con aproximadamente el 70% del agua renovable y el centro y norte con el restante 30%.



Figura 2.1. Distribución del agua renovable per cápita

Fuente: CONAPO, 2015; INEGI, 2008 y 2015

Se presentan variaciones importantes entre las características regionales. Al agruparse las regiones hidrológico-administrativas V, X, XI y XII, que se encuentran en el sureste del país, se pueden contrastar con las regiones restantes. Las regiones del sureste presentan dos terceras partes del agua renovable en el país, con una quinta parte de la población que aporta la quinta parte del PIB nacional. Las regiones del norte, centro y noroeste cuentan con una tercera parte del agua renovable del país, cuatro quintas partes de la población y de la aportación regional al PIB nacional. Considerando el agua renovable per cápita, la disponible en las regiones del sureste es siete veces mayor que la disponible en el resto de las regiones hidrológico-administrativas de nuestro país (CONAPO, 2015; INEGI, 2008).

Anualmente México recibe aproximadamente 1 449 471 millones de metros cúbicos de agua en forma de precipitación. De esa agua, se estima que el 72.5% se evapotranspira y regresa a la atmósfera, el 21.2% escurre por los ríos o arroyos, y el 6.4% restante se infiltra al subsuelo de forma natural y recarga los acuíferos (CONAGUA, 2015).

El agua renovable se debe analizar desde tres perspectivas:

- Distribución temporal: En México existen grandes variaciones del agua renovable a lo largo del año. La mayor parte de la lluvia ocurre en el verano, mientras que el resto del año es relativamente seco.
- Distribución espacial: en algunas regiones del país ocurre precipitación abundante y existe una baja densidad de población, mientras que en otras sucede lo contrario.
- Área de análisis: la problemática del agua y su atención es predominantemente de tipo local. Los indicadores calculados a gran escala esconden las fuertes variaciones que existen a lo largo y ancho del país.

La tabla 2.1 presenta un resumen de la situación del agua renovable en México:

Tabla 2.1 Recarga media total de acuíferos por zona hidrológica

Número de RHA	Agua renovable (hm ² /año)	Población a medio año (mill. hab.)	Agua renovable per cápita (m ³ /hab/año)	Escurrimiento natural medio superficial total (hm ² /año)	Recarga media total de acuíferos (hm ² /año)
I	4 958	4.37	1 135	3 300	1 658
II	8 273	2.80	2 951	5 066	3 207
III	25 596	4.47	5 730	22 519	3 076
IV	22 156	11.69	1 896	16 805	5 351
V	30 565	5.02	6 084	28 629	1 936
VI	12 316	12.15	1 014	6 416	5 900
VII	7 849	4.52	1 738	5 529	2 320
VIII	35 093	23.89	1 469	25 423	9 670
IX	28 085	5.23	5 366	24 016	4 069
X	95 129	10.48	9 075	90 424	4 705
XI	144 459	7.57	19 078	121 742	22 718
XII	29 324	4.52	6 494	4 008	25 316
XIII	3 458	23.01	150	1 112	2 346
Total	447 260	119.71	3 736	354 990	92 271

Fuente: CONAGUA 2015; CONAPO, 2015

Tanto la sequía como las precipitaciones pluviales intensas, aunadas a factores como la topografía, el uso del suelo y el estado de la cubierta vegetal, pueden ocasionar afectaciones a la sociedad y a las actividades económicas. La sequía ocurre cuando las lluvias son significativamente menores a los niveles normales registrados, lo que ocasiona graves desequilibrios hidrológicos, que perjudican a los sistemas de producción agrícola. Cuando la lluvia es escasa e infrecuente y la temperatura aumenta, la vegetación se desarrolla con dificultad. Las sequías son los desastres naturales más costosos, pues afectan a más personas que otras formas de desastre natural. Adicionalmente la sequía puede enlazarse con fenómenos de degradación del suelo y deforestación. En temporada de

sequía se incrementan los riesgos de incendios forestales (INEGI, 2013). En la figura 2.2 se pueden observar las partes del país que presentaron sequía en el año 2014.

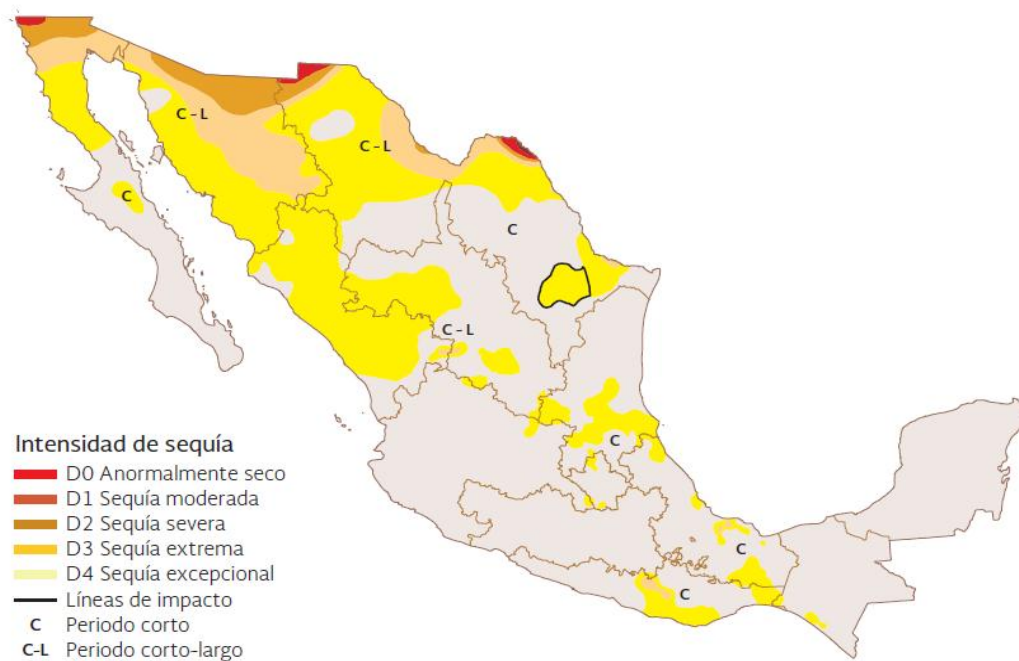


Figura 2.2. Regiones que presentan sequía
Fuente: CONAGUA, 2015

2.1 Agua subterránea y el abastecimiento público

Las fuentes de agua subterránea desempeñan un papel de creciente importancia en el desarrollo socioeconómico del país, gracias a sus características físicas que les permiten ser aprovechadas de manera versátil, pues funcionan como presas de almacenamiento, siendo posible extraer agua en cualquier época del año de prácticamente cualquier punto de la superficie del acuífero. Funcionan además como filtros purificadores, preservando la calidad del agua.

La importancia del agua subterránea se manifiesta en la magnitud del volumen utilizado por los principales usuarios. El 38.7 % del volumen total concesionado para usos consuntivos (32 906 millones de m³ por año al 2014), procede de agua subterránea. En la figura 2.3 se hace una comparación entre los volúmenes concesionados para usos consuntivos por tipos de fuente: subterránea y superficial. En general se aprecia un aumento de volumen a través de los años.

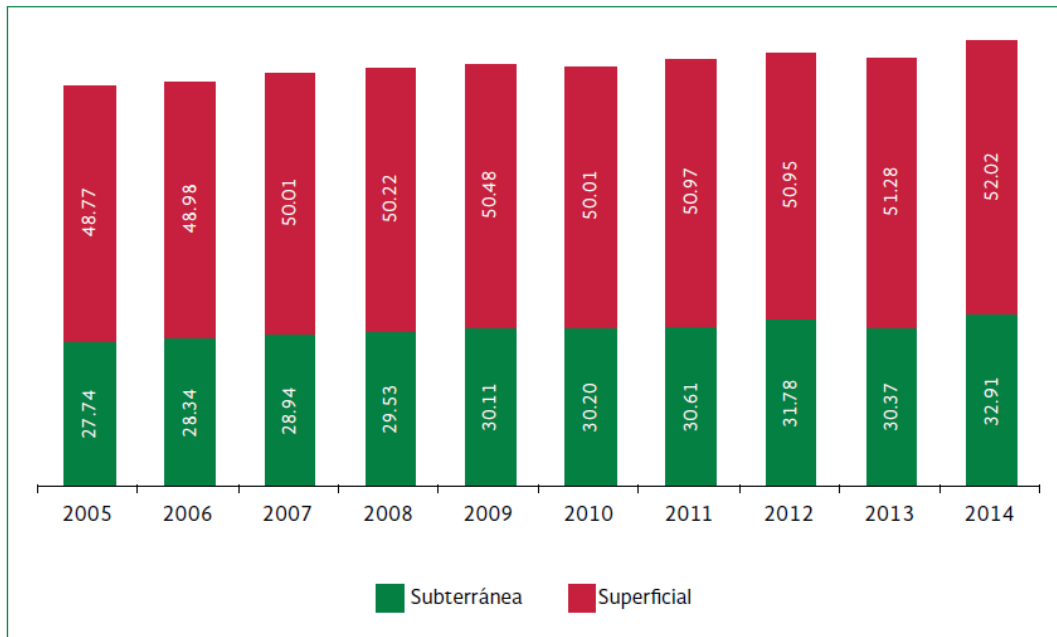


Figura 2.3 Volumen concesionado para usos consuntivos por tipos de fuente, 2005-2014 (miles de hm³)
Fuente: CONAGUA, 2015

La distribución de los usos se puede visualizar en el tiempo conforme a la evolución de los volúmenes concesionados. En la figura 2.4 se compara el volumen concesionado o asignado por municipio en 2014 respecto al volumen en 2005, para indicar si se incrementó o disminuyó.

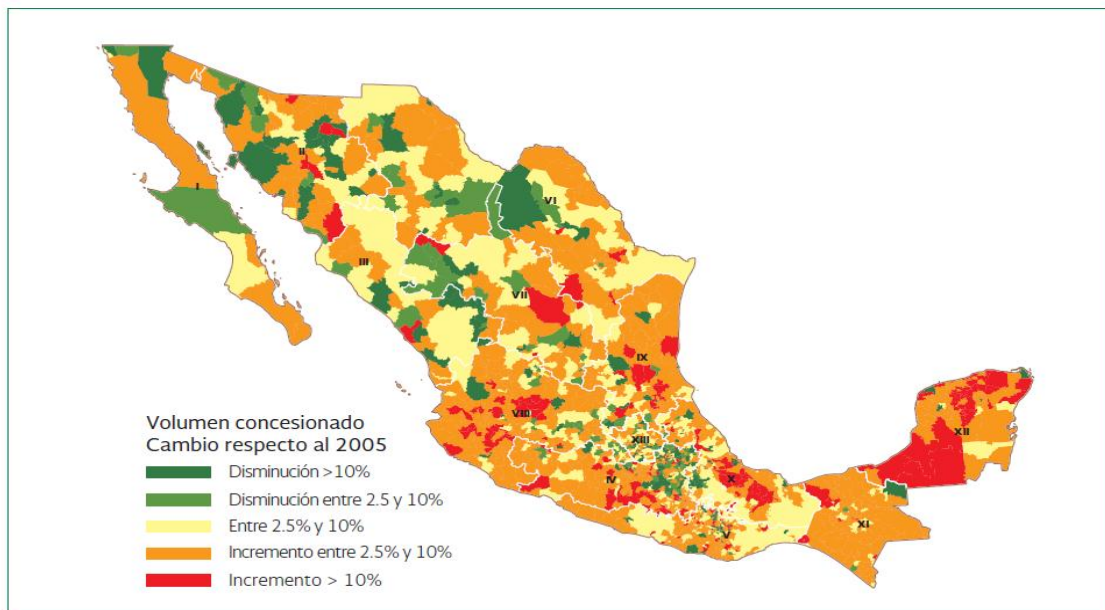


Figura 2.4 Evolución de usos consuntivos por municipio, comparación 2005-2014
Fuente: CONAGUA, 2015

Para abastecimiento público, la fuente predominante es la subterránea con el 60.5 % del volumen, como se muestra en la figura 2.5. Cabe destacar que del 2005 al 2014 el agua superficial asignada para este uso creció un 22.8%.

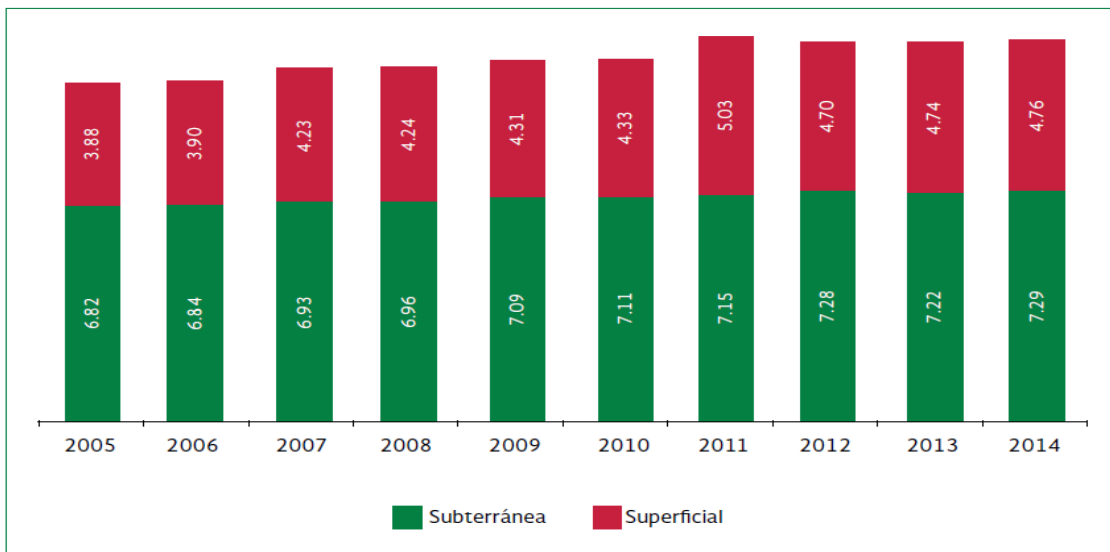


Figura 2.5 Volumen concesionado de uso agrupado abastecimiento público por tipo de fuente, 2005-2014 (miles de hm³)

Fuente: CONAGUA, 2015

Ante el uso intensivo del agua subterránea para el abastecimiento de agua potable deberá de considerarse el impacto en la disponibilidad que se refleja en el número de acuíferos sobreexplotados el cual ha oscilado anualmente entre 100 y 106. Al 31 de diciembre de 2014 se reportaron 106 acuíferos sobreexplotados. De acuerdo con los resultados de los estudios recientes, se define si los acuíferos se convierten en sobreexplotados o dejan de serlo, en función de la relación extracción/recarga. Más allá de definir si un acuífero tiene sobreexplotación o no, el aprovechamiento de este recurso deberá ser de manera sustentable en un futuro cercano. La figura 2.6 muestra en color verde los acuíferos clasificados con disponibilidad de agua.



Figura 2.6 Disponibilidad de acuíferos en México

Fuente: CONAGUA, 2015

2.2 Grado de presión sobre el recurso

El porcentaje que representa el agua empleada en usos consuntivos respecto al agua renovable es un indicador del grado de presión que se ejerce sobre el recurso hídrico de un país, cuenca o región. El grado de presión puede ser muy alto, alto, medio, bajo y sin estrés. Se considera que si el porcentaje es mayor al 40% se ejerce un grado de presión alto o muy alto.

A nivel nacional, México experimenta un grado de presión del 19%, lo cual se considera de nivel bajo; sin embargo, las zonas centro, norte y noroeste del país experimentan un alto grado de presión. En la figura 2.7 se aprecian los distintos grados de presión existentes en el país.

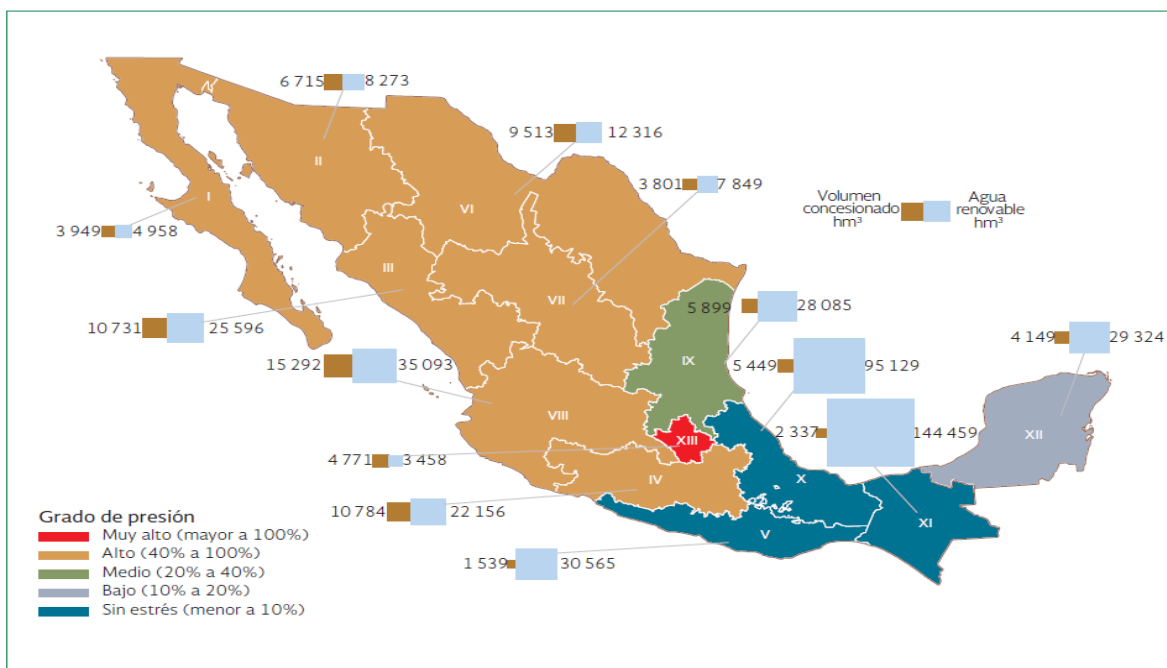


Figura 2.7 Grado de presión sobre el recurso hídrico, 2014

Fuente: CONAGUA, 2015

2.3 Cobertura de agua potable

La CONAGUA considera que la cobertura de agua potable incluye a todas aquellas personas que tienen agua entubada dentro de la vivienda; fuera de la vivienda, pero dentro del terreno; de la llave pública; o bien de otra vivienda. El cálculo de dicha cobertura se lleva a cabo a partir de los censos y conteos de población.

Tomando en cuenta esta definición y los resultados del Censo de Población y Vivienda 2010, al 25 de junio de 2015, el 90.9% de la población tenía cobertura de agua potable. La CONAGUA estima que, al cierre del año 2014, la cobertura de agua potable fue de 92.4%, cuyo desglose es el siguiente: 95.1% de cobertura en zonas urbanas y 82.8% en zonas rurales. La evolución de los porcentajes de

cobertura debe contemplarse a la par que el crecimiento poblacional y la concentración urbana, es decir, los porcentajes en años sucesivos van representando cada vez mayor cantidad de habitantes: solamente el mantenimiento del porcentaje de cobertura implica la incorporación de habitantes a los servicios.

La evolución de la población con cobertura es diferencial con respecto del rango de población de la localidad. La cobertura para la población en localidades grandes (mayores de 100 000 habitantes) se ha incrementado más rápidamente que en localidades más pequeñas.

No obstante, debe tomarse en cuenta que el incremento de la población es mayor en las localidades urbanas, en tanto que la población rural crece a menor velocidad.

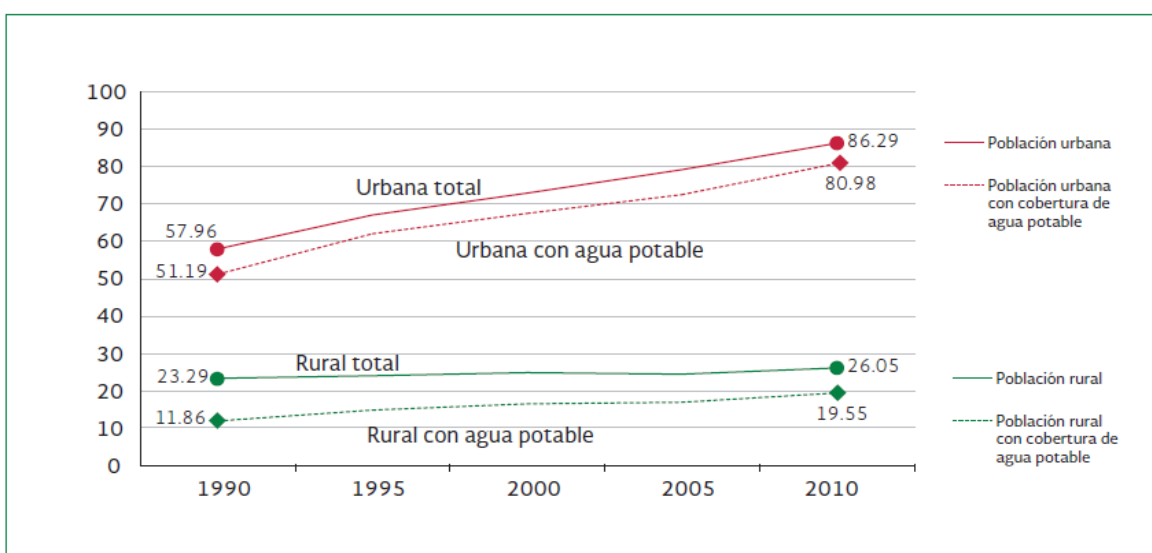


Figura 2.8 Evolución de la población rural y urbana con cobertura de agua potable (millones de habitantes)

Fuente: CONAGUA, 2007 y CONAGUA, 2015

CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se incluyen los antecedentes históricos del reúso del agua, se definen los conceptos más utilizados a lo largo de la tesis, se presentan los casos emblemáticos de reúso directo que existen en el mundo, así como sus diversos modos de operación, la normatividad o lineamientos para el reúso de agua residual para consumo humano, y finalmente se analizarán los procesos de tratamiento.

3.1 Reúso potable de agua residual

La historia del reúso y el reciclaje del agua residual tiene sus orígenes en los sistemas de “drenaje”, que canalizaban el agua para su posterior reúso, de la civilización Minoica en la actual isla de Creta entre los años 3000 y 1450 a. C. (Angelakis and Spyridakis, 1996). A pesar de que el reúso del agua se ha estado practicando en diversas partes del mundo por siglos, hay numerosos factores que han contribuido para aumentar el reciente interés en el reúso del mismo. En países industrializados los problemas asociados a la distribución adecuada del agua han tenido un crecimiento importante; aunado a esto los precios para tratar el agua y alcanzar las cada vez más exigentes normas también han aumentado. En países donde el crecimiento demográfico es alto, particularmente aquellos que se encuentran en zonas áridas del planeta, se necesitan métodos confiables, de bajo costo y que cuenten con la tecnología actual para recurrir a nuevas fuentes de agua y proteger las que ya se tienen de la contaminación. Durante la planeación y la implementación de un sistema de reúso de agua, la calidad final del agua, el método de distribución y el uso que se le dará dictaminarán el grado y tipo del tratamiento requerido. Así como se demuestra que la tecnología mejora cada vez más la confiabilidad en los sistemas de reúso de agua, es de suponerse que el reúso del agua continuará expandiéndose en el futuro.

A finales del siglo XX los beneficios de promover el reúso del agua residual como forma de complementar los recursos de agua han sido reconocidos por la mayoría de las legislaturas en Estados Unidos, así como por la Unión Europea. Por ejemplo, en 1970 el Código Estatal del Agua de California dictaminó que: “es intención de la Legislatura que el Estado considere todas las posibilidades para fomentar el desarrollo para el reúso del agua para que dicho volumen de agua pueda cubrir los crecientes requerimientos del Estado” (California Water Code, 1988 Amendments). En el mismo contexto, la Comisión de la Comunidad Europea declaró que “el agua residual tratada deberá ser reusada siempre que sea apropiado. Las rutas de disposición final deberán minimizar los efectos adversos en el ambiente” (EEC, 1991).

Durante los años noventa el interés en el reúso del agua aumentó en todo el planeta debido a la creciente presión por el abastecimiento de agua de calidad para la agricultura, la industria y para el uso público. Hoy en día los tratamientos de agua residual y los procesos de purificación existentes producen agua prácticamente de cualquier calidad deseada. El reúso del agua ha evolucionado tanto hasta convertirse en un factor integral en la planeación óptima y eficiente del agua. Los avances en la microbiología a finales del siglo XIX propiciaron lo que se conoce como “*Great Sanitary Awakening*” (Fair and Geyer, 1954) y el advenimiento de los procesos de desinfección. El desarrollo del proceso de lodos activados en 1904 fue un paso muy significativo en el tratamiento de agua y el control de la contaminación y para el desarrollo de sistemas de tratamiento biológicos.

Los avances tecnológicos en procesos físicos, químicos y biológicos para el tratamiento de agua residual en el siglo XX llevaron a lo que se conoce como “La era del reúso y reciclaje del agua residual” (Takashi and Levine, 1996). Desde 1960 se iniciaron exhaustivas investigaciones debido a las regulaciones cada vez más estrictas en cuanto a los riesgos a la salud y a los conceptos de reúso del agua. En 1965, el ministro de salud de Israel estableció normas para permitir el reúso de efluentes secundarios para riego de cultivos con la excepción de aquellos que se comen crudos. En 1968 se inició una amplia investigación acerca del reúso potable directo, en Windhoek, Namibia. Durante los años 70 y 80 el posible riesgo a la salud y los requerimientos técnicos para reúso potable y no potable fueron estudiados; estos esfuerzos resultaron en un incremento en la puesta en práctica de proyectos de reúso de agua en varias regiones y la aparición de nuevas alternativas. Un evento particularmente notable fue la publicación de “La guía para el reúso del agua” por parte de la EPA (1992).

En proyectos de reúso de agua residual, la calidad de los procesos de tratamiento, la valoración de los riesgos y la confianza del público en sistemas de reúso en combinación con la creciente demanda de agua y los requisitos de control de la contaminación han promovido la integración del reúso del agua como parte de las estrategias de manejo de los recursos hídricos en todo el mundo. Es muy importante reconocer que la aceptación pública de proyectos de reúso es vital para el futuro del reúso de agua residual y el reciclaje; las consecuencias de una percepción negativa o insuficiente ponen en riesgo futuros proyectos en los que se involucre el reúso directo de agua residual.

En años recientes el reúso del agua residual ha recibido atención ya que presenta una fuente de agua adicional. En zonas áridas la idea del reúso es lógica ya que disminuiría la carencia de agua que de por sí se sufre en esas áreas. Los recursos hídricos disponibles cada vez están más contaminados, por eso el tratamiento del agua de esas fuentes para uso doméstico debe de ser más complejo que

los procesos de potabilización convencionales. Mientras tanto la situación del medio ambiente demanda tratamientos más intensos del agua residual antes de su descarga a cuerpos receptores de agua. Por lo tanto, es inminente cerrar el ciclo y reusar el agua.

El reúso para propósitos industriales ha sido bastante estudiado, así como el reúso para la agricultura que ya se aplica en muchas partes. Se reconocen dos clasificaciones de agua: reúso directo y reúso indirecto. El reúso indirecto se ha estado practicando por muchos años. En este caso, las localidades que extraen el agua de fuentes superficiales en sitios que se ubican después de otras comunidades de hecho están reusando el agua residual que fue desechada por otras comunidades en sitios anteriores del mismo río, pero diluidas (Dishman, 1989). El reúso de agua directo es la recuperación de agua residual para satisfacer las necesidades de una comunidad o para aumentar los recursos ya existentes de la misma distribuyendo el agua residual tratada directamente a los sitios de uso.

Los proyectos de reúso directo han sido, hasta la fecha, del tipo no potable, aunque la intención es usar esta agua recuperada para consumo humano. La única excepción a esto es el proyecto de reúso potable directo en Windhoek, Namibia. En todo el planeta existen muchos casos de reúso no potable proveyendo agua para uso en la agricultura, en la industria, sistemas de enfriamiento, etc. Tan solo en California existen más de 400 proyectos de reúso no potable y cinco de reúso potable indirecto en los cuales el agua residual tratada es utilizada para recarga de acuíferos (Crook, 1985). Dado que los proyectos para reúso indirecto se utilizan cada vez más, se especula la posibilidad de que las comunidades cambien al reúso potable directo para aumentar sus fuentes de abastecimiento que cada vez son menos.

3.2 Casos de reúso más emblemáticos

Una visión general de los proyectos que son ejemplos de RPD, sin utilizar almacenamiento, se presenta a continuación. Los proyectos descritos incluyen ejemplos que (1) se llevaron a cabo en el pasado, (2) están en operación actualmente, o (3) están en diseño/construcción. La importancia de estos ejemplos es que tanto los diagramas de flujo de proceso y las tecnologías de tratamiento utilizadas han sido aceptadas por varias autoridades reguladoras ya que son capaces de producir agua potable para beber segura, y la implementación de estos proyectos ha sido aceptada por la población. A pesar de que el “Sistema de Reabastecimiento de Agua Subterránea” (GWRS por sus siglas en inglés) en el Condado de Orange no es un ejemplo de RPD, también fue incluido dado que el agua purificada que es producida para la recarga de acuíferos representa un ejemplo donde el

agua es segura para un reúso directo y pudiera servir como un punto de referencia para otros proyectos. Se eligieron ocho proyectos de más de 15 reportados en la literatura:

1. Ciudad de Windhoek, Namibia (1968-actualidad)
2. Pure Cycle Corporation, Colorado (1976-1982)
3. Denver Potable Reuse Demonstration Project (1985-1992)
4. National Aeronautics and Space Administration (NASA) International Space Station (2009)
5. Village of Cloudcroft, Nuevo México (en construcción)
6. Big Springs, Texas (Mayo 2013)
7. Orange County Water District GWRS, California (2007)
8. Changi, Singapur (2010)

El enfoque del siguiente resumen es principalmente en las tecnologías de tratamiento y no en los componentes del influente, las propiedades microbiológicas o toxicológicas, o la aceptación pública.

1. Ciudad de Windhoek, Namibia

La Ciudad de Windhoek es la capital de Namibia, el país más árido de África. El país tiene un área superficial de 825,000 km² y una población de 2.2 millones de habitantes, haciéndola uno de los países menos poblados del mundo. La población de Windhoek es aproximadamente de 250,000 habitantes. Desde 1968, Windhoek ha estado incrementando agua recuperada altamente tratada a sus sistemas de distribución de agua potable. La mezcla del agua recuperada con agua potable se lleva a cabo directamente en el sistema de distribución de agua potable que abastece a la población.

El agua recuperada cumple con La Guía de agua bebible de Namibia, con los parámetros de la Organización Mundial de la Salud y con el reglamento de Sudáfrica (Tchobanoglous et al., 2011). El proyecto es operado dependiendo los parámetros intermedios obtenidos al final de cada proceso.

Diagrama de flujo de proceso del tratamiento

A la planta de tratamiento de Gorengab inicial (figura 3.1-a), que hoy en día se conoce como la “vieja” planta de Gorengab, se hicieron una serie de actualizaciones, siendo la última de estas en 1997, (figura 3.1-b). El diseño final de la planta está basado en la experiencia ganada a través de 30 años de recuperación de agua y reúso, incluye nuevos procesos como la ozonación y la ultrafiltración. Antes de que estos últimos dos procesos fueran acoplados al proceso principal,

fueron evaluados en escala piloto por un periodo de más de 30 meses, para verificar el desempeño de estos nuevos procesos.

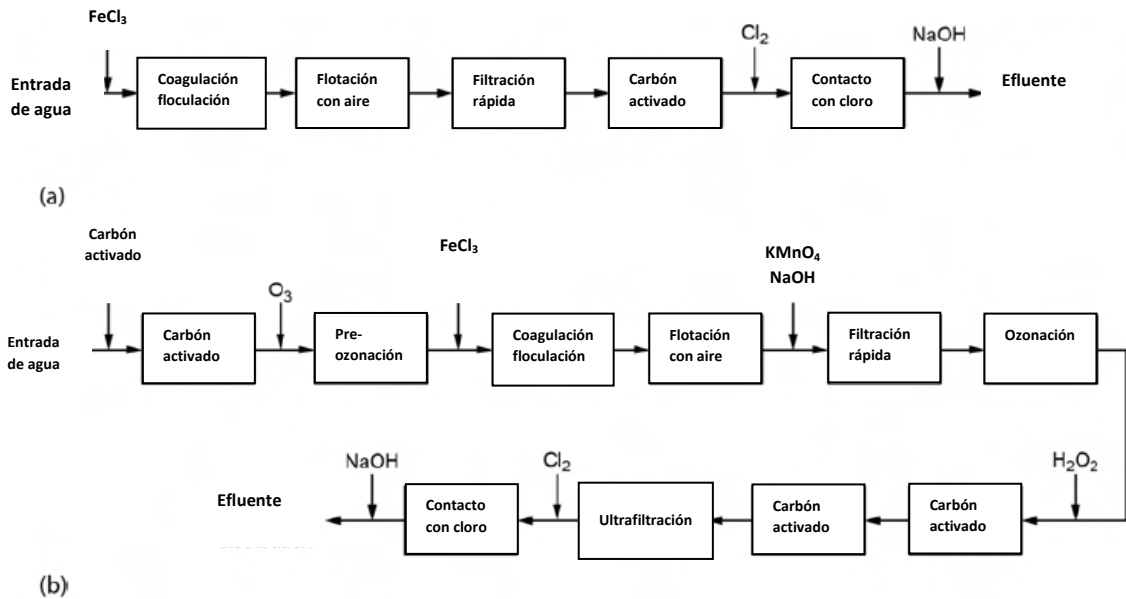


Figura 3.1 Diagramas de flujo de los procesos que se llevan a cabo en la Planta de Recuperación de Agua de Goreanbag en Windhoek, Namibia. (a) Proceso original y (b) el proceso con la última actualización de 1997. Piasani (2005); Lahnsteiner y Lempert (2005).

2. Pure Cycle Corporation, Colorado

A finales de los años 70, Pure Cycle Corporation desarrolló un sistema de reciclaje de agua completo para la producción de agua potable para consumo humano. Un gran número de estos sistemas fueron instalados en Colorado en casas individuales durante el periodo de 1976 – 1982. Los sistemas operaron exitosamente por varios años. Finalmente, la compañía no les pudo dar mantenimiento por problemas financieros y su uso se discontinuó (Tchobanoglous et al., 2011). Es interesante notar que a pesar de que la compañía ya no pudo ofrecer mantenimiento a los sistemas, los propietarios hicieron una petición al estado para que les permitieran seguir usando los sistemas de reciclaje.

Diagrama de flujo de proceso del tratamiento

La operación del sistema (figura 3.2) puede ser descrita de la siguiente manera: Primero, el agua de desecho de la casa se descarga a un tanque de almacenamiento. Después, esa agua pasa por un triturador (opcional) y se bombea a otro tanque que tiene dos compartimentos. Un compartimento sirve como tanque de reserva para el agua que no es tratada, con una capacidad suficiente para

almacenar el agua por dos días, y el segundo compartimento funciona para retener los desechos sólidos del proceso de tratamiento biológico. El agua residual en el tanque de almacenamiento es bombeada hacia el proceso de tratamiento biológico, el cual incluye una sección de tratamiento biológico y una sección de filtración.

La sección de tratamiento biológico emplea biodiscos rotativos. El proceso de filtrado utiliza discos rotatorios cubiertos por tela (cloth media) que sirven de filtro al efluente. El agua tratada biológicamente y filtrada es bombeada a una membrana de microfiltración. El efluente de la membrana circula a través de una columna de intercambio iónico, el cual también incluye absorbentes orgánicos. El efluente de la columna de intercambio iónico pasa a una unidad de radiación UV para protección adicional contra patógenos antes de ser descargado a un tanque de almacenamiento limpio para el uso doméstico. Detalles adicionales pueden ser encontrados en la patente original (U.S. Patent, 1979). El sistema estaba totalmente instrumentado y controlado con un microprocesador constituido por 3 partes elementales: monitor, control y alarmas.

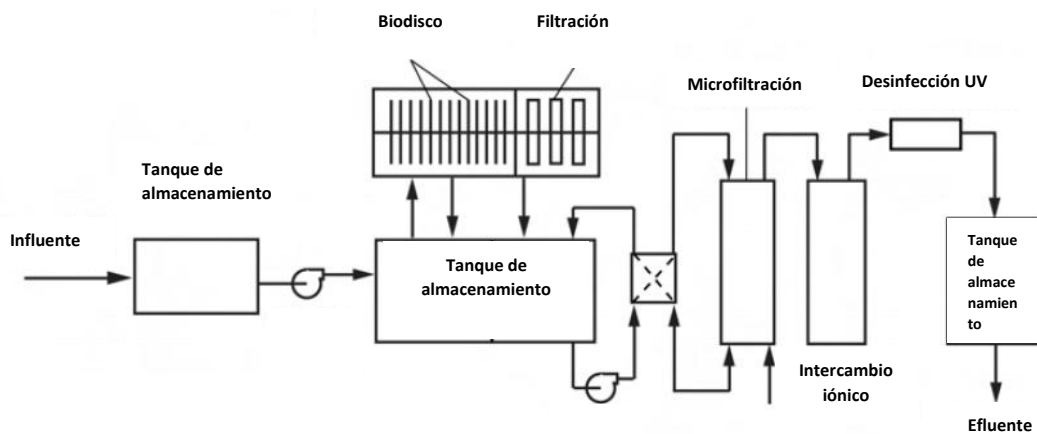


Figura 3.2 Diagrama del sistema cerrado de reúso de agua de la compañía Pure Cycle Corporation.
(Adaptado de la patente U.S No. 4,145,279)

3. Proyecto de reúso potable de Denver

En el periodo de 1985 a 1992, la Ciudad de Denver llevó a cabo un proyecto de demostración de reúso potable. El objetivo del proyecto fue examinar la viabilidad de convertir efluentes secundarios de sistemas de tratamiento de agua residual a agua potable con alta calidad tal que pudiera ser bombeada directamente a los sistemas de distribución. El caudal de agua que entraba a la planta de demostración de reúso era un efluente secundario sin clorar que provenía de la planta de tratamiento y recuperación de agua residual metropolitana de Denver. Los tratamientos que se

realizan en dicha planta consisten en cribado, remoción de arcillas, sedimentación primaria, lodos activados y sedimentación secundaria.

Diagrama de flujo del proceso de tratamiento

Con un caudal de 0.38 m³/d la planta de demostración de reuso potable utilizaba tratamiento avanzado que consistía en múltiples procesos y operaciones para lograr una remoción de todos los contaminantes (figura 3.3). El tratamiento inicial era aireación, seguido del proceso de coagulación-floculación, adicionando cal y cloruro férrico para optimizar la sedimentación. Después de la sedimentación, la recarbonatación se utilizaba para ajustar el pH aproximadamente a 7.8 seguido de un sistema de tres filtros. El sistema de filtración removía la turbiedad hasta valores de 0.5 NTU, para posteriormente pasar a los procesos avanzados donde el caudal se dividía en dos partes iguales pasando por membranas de ósmosis inversa o ultrafiltración y finalizar con burbujeo de aire, ozonación y cloración (Tchobanoglous et al., 2011).

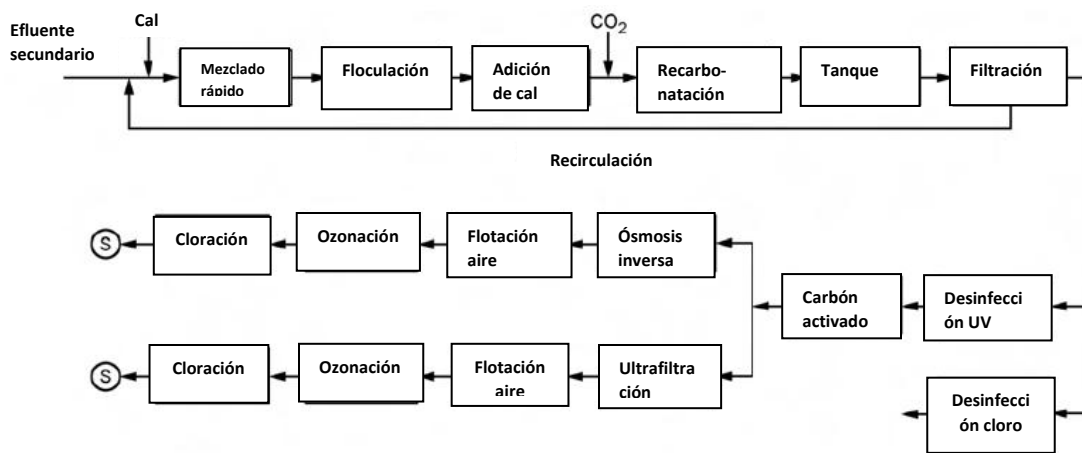


Figura 3.3 Diagrama de proceso de la planta de demostración de Denver (Adaptado de Lauer y Rogers, 1998).

4. Estación espacial internacional

Para incrementar el número de tripulantes de la Estación Espacial Internacional de tres a seis, fue necesario desarrollar Sistemas de Soporte de Vida y Control del Medio Ambiente. (ECLSS, por sus siglas en inglés). El ECLSS está conformado por el sistema de recuperación de agua y el procesador de orina. Estos dos sistemas son usados para producir agua potable, mezclando sus dos productos finales tratados en la Estación Espacial. A pesar de que no se trata de un caso exactamente de RPD,

este ejemplo se incluye para ilustrar la variedad de tecnologías que se han aplicado a la purificación de agua.

Diagrama de flujo del proceso de tratamiento Sistema de recuperación de agua (SRA)

El SRA es usado para tratar el condensado del sistema de control de temperatura y humedad y el destilado del sistema de recuperación de orina (figura 3.4). El agua de estas dos fuentes es almacenada en un tanque de agua residual. De dicho tanque el gas es removido del agua antes de ser bombeada a través de un filtro para remover partículas suspendidas. Al salir de este filtro circula a través de lechos de filtración operadas en serie, donde los componentes orgánicos e inorgánicos son removidos, después el agua es pasada a través de un reactor catalítico para la remoción de los componentes orgánicos que permanecieron después de la filtración.

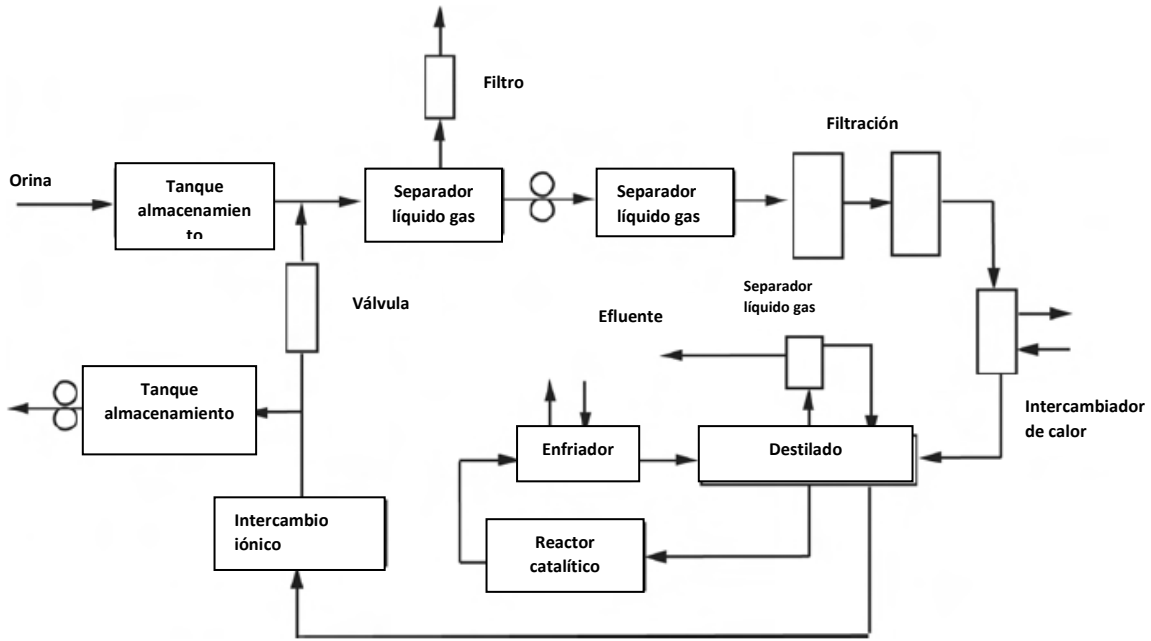


Figura 3.4 Diagrama de proceso del tratamiento del condensado del sistema de control de temperatura y humedad y del destilado del sistema de recuperación de orina en la Estación Espacial Internacional (Adaptado de Carter, 2009).

Los componentes orgánicos remanentes son removidos por oxidación térmica en presencia de oxígeno y catalizador. Un intercambiador de calor es usado para recuperar calor del reactor catalítico para mejorar la eficiencia. Un separador agua/gas remueve el exceso de oxígeno y subproductos de la oxidación antes de que el agua procesada sea retornada al sistema de distribución de agua.

Procesador de orina

Como se muestra en la figura 3.5, la orina en la Estación Espacial es transferida a un tanque de almacenamiento de agua residual, ahí es mezclada con agua del tanque de filtración. Dicha mezcla es transferida a la unidad de destilación con una bomba de desplazamiento positivo. Después de la destilación, el vapor saturado se transfiere a un separador agua/gas donde el agua se separa del vapor. El condensado del evaporador y el agua del separador son mezclados y bombeados al sistema de distribución.

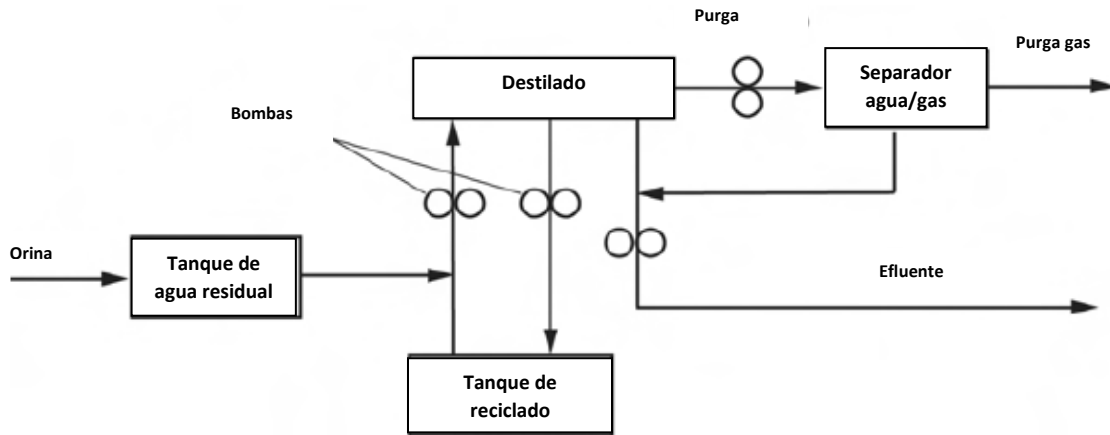


Figura 3.5 Diagrama del proceso del tratamiento de la orina en la Estación Espacial Internacional.

(Adaptado de Carter, 2009).

5. Villa de Cloudcroft, Nuevo México

La villa de Cloudcroft es una pequeña comunidad en la montaña, localizada al sur de Albuquerque, a una elevación de 2620 metros. La población permanente es cercana a 850 habitantes, pero alcanza hasta 2000 personas en días festivos y fines de semana. El promedio de la demanda de agua es alrededor de 681,374 l/d con una demanda pico de 1,362,748 l/d. Las fuentes de abastecimiento principales son manantiales y pozos que han experimentado una baja de caudal debido a periodos de sequía. La comunidad recurría al acarreo de agua desde otras comunidades durante los fines de semana. Reconociendo que se necesitaba una solución a largo plazo, se desarrolló un plan para aumentar la distribución de agua con agua residual tratada, a nivel potable. El plan consistió en mezclar 378541 l/d de agua residual potabilizada con un porcentaje casi igual de agua proveniente de manantiales y pozos (Tchobanoglous et al., 2011). El agua mezclada se deposita en un tanque de almacenamiento durante aproximadamente dos semanas. Una vez que sale del tanque de almacenamiento es tratada antes de conducirla al sistema de distribución.

Diagrama de flujo del proceso de tratamiento

Como se muestra en la figura 3.6, al tratamiento avanzado de agua residual utiliza un biorreactor de membrana, después un tratamiento de desinfección, después una membrana de ósmosis inversa y finalmente oxidación avanzada. El agua tratada es mezclada con el agua proveniente de manantiales y pozos y depositada en el tanque de almacenamiento. Al salir del tanque se trata con ultrafiltración, desinfección UV, carbón activado y una desinfección final antes de ser introducida al sistema de distribución. Al revisar el proceso de tratamiento es interesante notar que muchas de las unidades de proceso utilizadas son similares a las empleadas en el Condado de Orange.

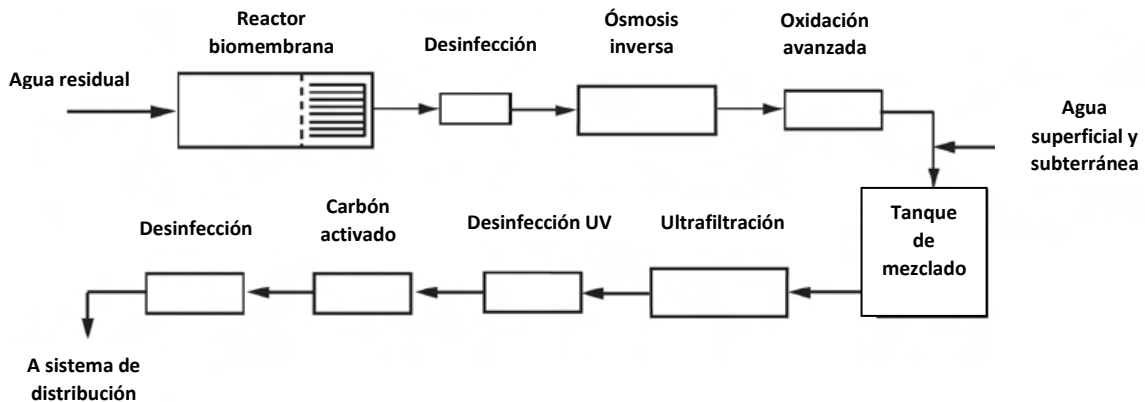


Figura 3.6 Esquema de Cloudcroft, NM (Adaptado de Livingston, 2008).

6. Big Springs, Texas

Las comunidades de la Cuenca Permiana al oeste de Texas han experimentado numerosos problemas en el abastecimiento de agua debido a largos periodos de baja precipitación. A pesar de que la recuperación de agua se ha practicado durante bastante tiempo, las condiciones de sequía han forzado a las comunidades a buscar otras fuentes de abastecimiento. Con este fin, el Distrito Municipal de Agua del Río Colorado, que es el encargado de abastecer el agua a varias ciudades que se encuentran en la cuenca, ha tomado la iniciativa “recupera el 100% del agua, el 100% del tiempo”. Los elementos clave de esta iniciativa son: (1) establecer una infraestructura para captar toda el agua residual antes de ser descargada a un cuerpo de agua natural, (2) desarrollar instalaciones a nivel local y regional para recuperar el agua captada y (3) desarrollar sistemas para mezclar el agua recuperada con las otras fuentes de abastecimiento (Tchobanoglous et al., 2011). Este es el primer proyecto que se llevó a cabo por el Distrito fue Big Springs, Texas.

Diagrama de flujo del proceso de tratamiento

El diagrama del sistema de tratamiento de Big Springs se muestra en la figura 3.7, después de un tratamiento terciario, la planta utiliza una membrana de filtración, seguido de una membrana de ósmosis inversa y oxidación avanzada. El agua, que fue sometida a tratamiento avanzado, después es mezclada con agua cruda proveniente de fuentes naturales. El agua mezclada es tratada en un sistema de potabilización convencional.

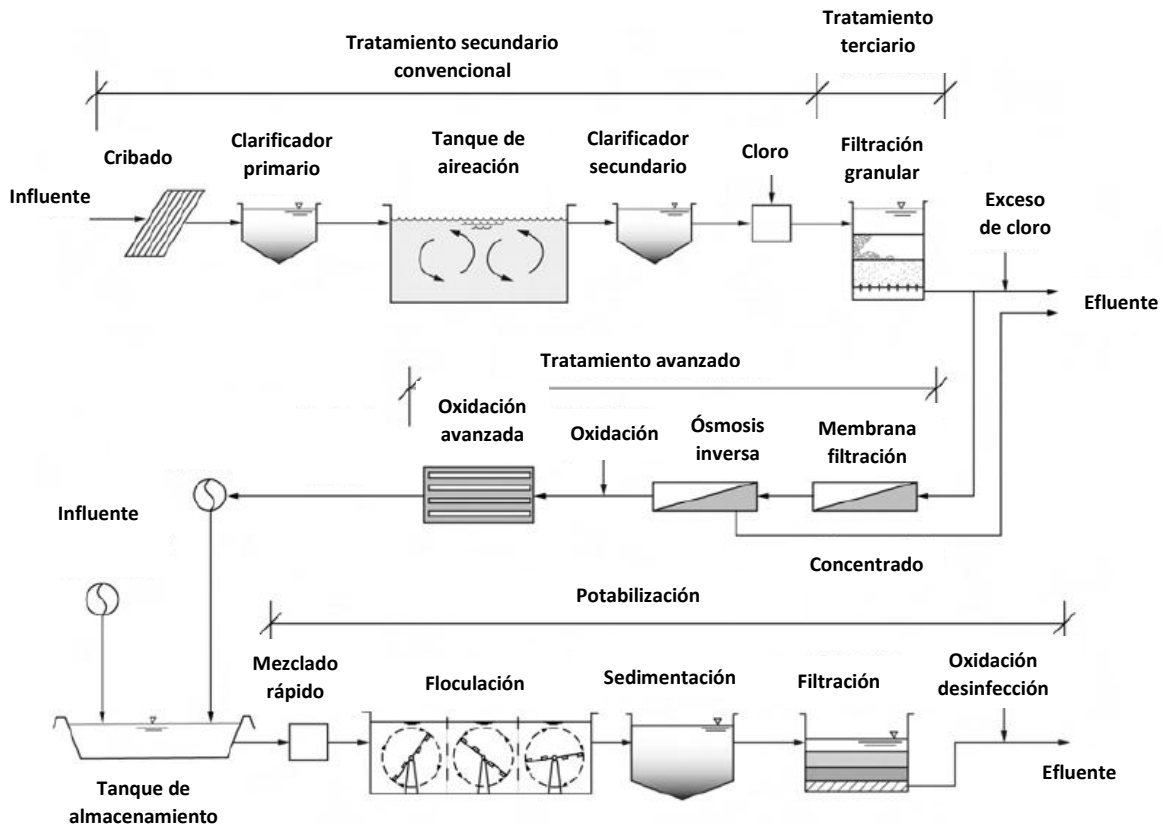


Figura 3.7 Esquema de Big Springs (Adaptado de Sloan et al., 2009).

7. Condado de Orange

Actualmente el sistema de abastecimiento de agua subterránea del Condado de Orange cuenta con las instalaciones más grandes del mundo de su tipo, empleando las más recientes tecnologías de tratamiento. Este sistema es considerado aquí ya que el agua que se obtiene al final, como lo reporta Burris (2010), ha sido estudiada intensamente y se determinó que es altamente purificada, cumpliendo todos los requerimientos estándar para agua potable.

Diagrama de flujo del proceso de tratamiento

El agua que entra a la planta de tratamiento proviene de un efluente secundario del Distrito de Orange. Las instalaciones del sistema avanzado de tratamiento que se muestran en la figura 3.8 incluyen los siguientes procesos: microfiltración, cartuchos de filtración, ósmosis inversa, oxidación avanzada (UV y peróxido de hidrógeno), remoción de CO₂ y adición de cal. Una parte del volumen de agua tratada es descargada a cuencas de abastecimiento donde se infiltra a los acuíferos subterráneos, y eventualmente pasa a formar parte de la fuente de abastecimiento del Condado de Orange. La otra parte se inyecta en una serie de pozos que tienen la función de barrera a la intrusión de agua salada además de formar parte de la reserva natural de agua dulce.

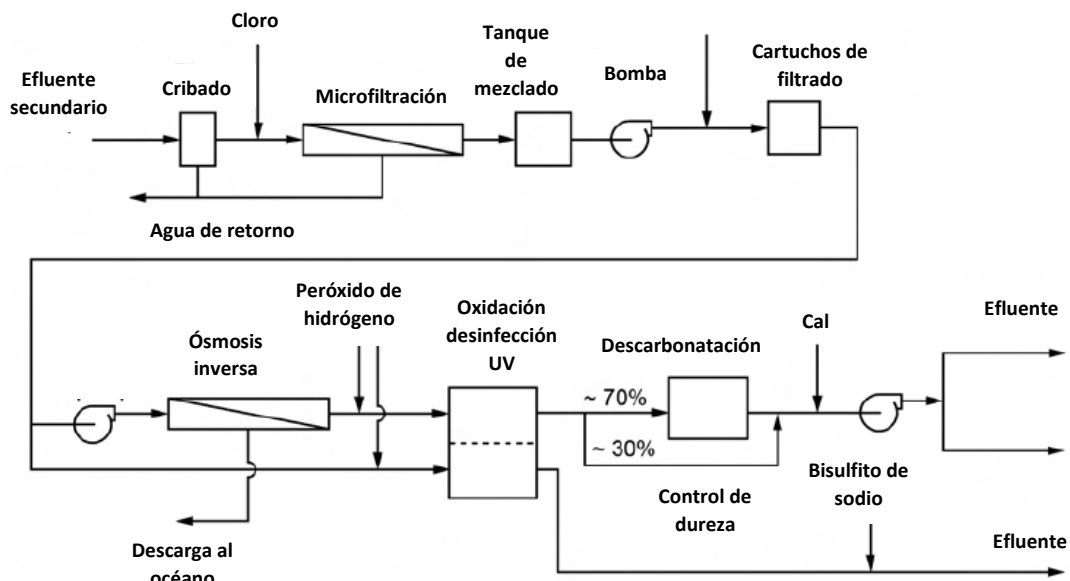


Figura 3.8 Esquema de la planta de tratamiento avanzado en el Condado de Orange (Tchobanoglous et al., 2011).

8. Planta de tratamiento de Singapur

Singapur es una pequeña isla, con una población aproximada de 4.5 millones de personas. Tiene una precipitación anual de 2.4 mm y un consumo de agua de 1.36 millones de m³, de los cuales más del 50 por ciento es utilizado por la industria, el resto es para el comercio y el uso doméstico. Para lograr el abastecimiento de agua en Singapur se cuenta con cuatro fuentes:

- Importada de Malasia
- Captación local
- NEWater (agua regenerada)

- Agua desalinizada

NEWater es agua regenerada de alta calidad, que cumple con estándares para agua potable. NEWater es una estrategia para el abastecimiento de agua para consumo, aprovechando el efecto multiplicador de la reutilización del agua (CONAGUA, 2014). Esta agua es reutilizada en usos no potables directos, como los procesos de fabricación de obleas y otros procesos industriales. Entre los usos potables indirectos, está la recarga por inyección directa en los embalses superficiales para posteriormente ser usada para el abastecimiento de agua potable. Para garantizar la seguridad de ambos tipos de agua, NEWater adoptó un enfoque de multi barrera (figura 3.9), el cual comienza desde la fuente y se extiende a los hogares en diversas etapas o barreras:

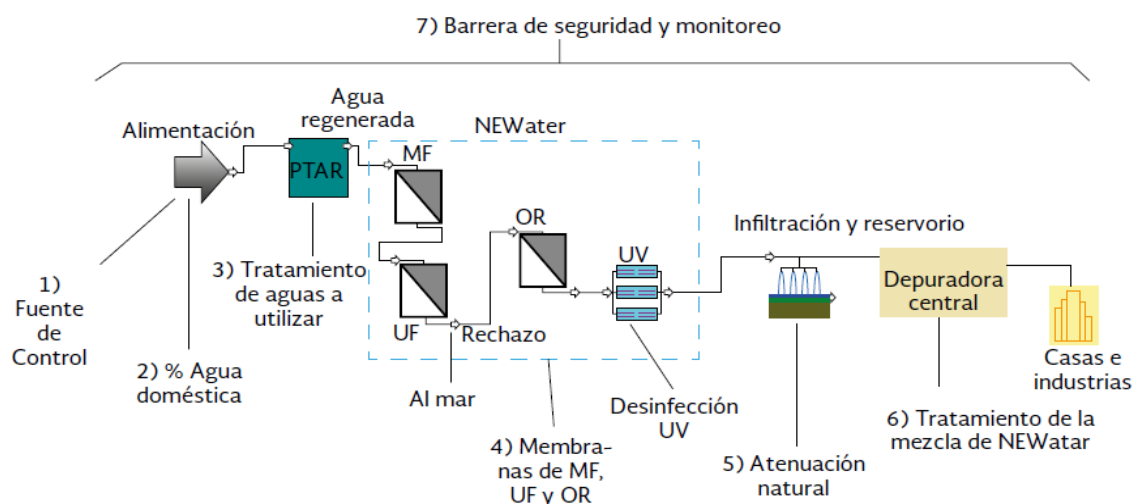


Figura 3.9 Tren de tratamiento de multibarreras en Singapur (CONAGUA, 2014)

Barrera 1. Fuente de control

En las industrias se asegurará que el agua residual recibida por las PTAR será tratada por completo y ofrecerán un efluente secundario de buena calidad como agua de alimentación para la producción en NEWater. Esto se logra cumpliendo reglamentos y legislaciones que controlan el uso y la eliminación de sustancias peligrosas, además de aplicar un continuo monitoreo de algunas sustancias como el COT.

Barrera 2. Más de 85 por ciento proviene de fuentes domésticas

Se cuenta con cuatro plantas NEWater en funcionamiento, con una capacidad total de diseño de 240 000 m³ al día, de la cual más de 85 por ciento son agua residual doméstica. En esta etapa se realiza un monitoreo, que incluye procesos físicos, inorgánicos, orgánicos, microbiológicos y rastreo de contaminantes.

Barrera 3. Tratamiento secundario de agua residual

Este tratamiento es un sistema que proporciona un efluente de buena calidad. Incluye controlar el ensuciamiento orgánico de las membranas, control que se traduce en más tiempo de lavado y limpieza química por intervalos para que la vida de la membrana sea más larga.

Barrera 4. Proceso de microfiltración y ósmosis inversa

El proceso de membranas brinda una buena remoción del COT, hasta llegar a concentraciones de 820 a 20 µg/L. Para mejorar aún más la producción y garantizar la calidad del agua, se cuenta con la capacidad de regenerar el permeado del sistema de ósmosis inversa. Se cuenta con un monitoreo continuo para registrar algún cambio abrupto en los resultados.

Barrera 5. Atenuación natural de la superficie de los reservorios

A pesar de que se cuenta con estándares para agua potable, el agua es descargada en presas de almacenamiento y mezclada con agua de lluvia, antes del tratamiento.

La permanencia en los embalses proporciona un buffer natural, además de proporcionar micronutrientes para la salud (calcio y magnesio). También permite que algunos contaminantes sean removidos a través de foto o biotransformación. Además, la radiación UV también genera la inactivación bacteriana y viral.

Barrera 6. Tratamiento convencional

La mezcla de agua de NEWater y la del embalse es tratada con procesos de coagulación, floculación, filtros de arena y desinfección, para posteriormente ser enviada a los hogares de la población como agua potable.

Barrera 7 de seguridad

Se realiza el control de toda el agua obtenida por NEWater monitoreando más de 290 parámetros, incluidos contaminantes emergentes que están listados en la USEPA como prioritarios. Tanto el agua utilizada para la recarga artificial como el agua utilizada por la población en usos de contacto no directo cumplen con las normas de calidad de la región.

3.3 Resumen de los casos emblemáticos

En la tabla 3.1 se muestran los tiempos de operación de los casos presentados, el tipo de influente a los sistemas de tratamiento para el reúso potable, el caudal tratado y el uso final del efluente. Con excepción del sistema de Pure Cycle Corporation, que era un sistema que se instalaba en un hogar, de todos los demás sistemas el influente principal proviene de plantas de tratamiento convencionales, las cuales no cuentan con un sistema avanzado de purificación y por eso es necesario enviarlas a plantas más especializadas para otorgar una mejor calidad.

Tabla 3.1 Resumen de algunas características de los casos emblemáticos

	Fechas	Fuente agua	Caudal	Uso final
Windhoek, Namibia	1968-actualidad	Efluentes de 2 plantas de tratamiento convencionales	21,000 m ³ /d	Agua potable y riego
Pure Cycle Corporation, Colorado	1976-1982	Agua residual doméstica		Necesidades básicas del hogar
Denver Potable Reuse	1985-1992	Planta de tratamiento convencional	0.38 m ³ /d	Riego, recarga de acuíferos, estudios
Village Cloudcroft	en construcción	Planta de tratamiento convencional	378 m ³ /d	Abastecer a la comunidad
Big Springs, Texas	Mayo 2013	Planta de tratamiento convencional	14.3 m ³ /d	Mezclado con agua superficial
Condado de Orange	2007	Planta de tratamiento convencional	46,000 m ³ /d	Recarga de acuífero vs intrusión salina
Changi, Singapur	2010	Efluente industrial secundario y agua residual doméstica	240,000 m ³ /d	Uso industrial y recarga de acuífero

En la tabla 3.2 se puede observar un resumen de los diferentes procesos utilizados en los casos emblemáticos, los números representan el orden en el que se llevan a cabo. Se reducen a 12 procesos dentro de los cuales lo más utilizados son: filtros de arena, la cloración (en casi todos), ozonación, ósmosis inversa, radiación UV y ultrafiltración. En cuanto al orden que llevan durante el tratamiento, no se observa un patrón, puesto que estos sistemas se basan en barreras múltiples y se pueden hacer muchas combinaciones. El número mínimo de tratamientos es de 5, llegando a contar hasta con 10 procesos por planta.

Tabla 3.2 Resumen de procesos utilizados

Procesos	C-F	F. A	F.Ar	CA	Cl	O ₃	OI	T.B	UV	I.I	UF	MF
Planta												
Windoek, Namibia	3	4	5	1,8	10	2,6		7			9	
Pure Cycle Corporation, Colorado								1	5	4	2	3
Denver Potable Reuse	1	6	5	4	8	7	5		3		2	
Village Cloudcroft				7	2	4	3	1	6		5	
Big Springs, Texas	6		2,7		1	5,8	4				3	
Condado de Orange			1		2		4		5			3
Changi, Singapur					6		3		4		2	1

*Coagulación-floculación: C-F, Flotación con aire: F. A, Filtro de arena: F.Ar, Carbón activado: CA, Cloro: Cl, Ozonación: O₃, Ósmosis Inversa: OI, Tratamiento biológico: T.B, Radiación UV, Intercambio iónico: I.I, Ultrafiltración: UF, Microfiltración: MF.

Es importante destacar que finalmente lo que determina el orden y número de procesos de tratamiento es la calidad del agua antes de entrar al tratamiento avanzado y que en gran medida está correlacionada con la fuente de procedencia de la misma.

3.4 Revisión de procesos

Una vez identificados los principales procesos utilizados en los casos emblemáticos de reúso de la sección anterior y con los procesos establecidos para esta investigación se realizó una investigación bibliográfica exhaustiva de cerca de 80 artículos para:

- I. Saber qué eficiencias aproximadas se esperarían de cada uno de los procesos
- II. Identificar casos de estudio similares reportados y las dificultades que se hayan tenido
- III. Observar las variables a controlar en cada proceso

En la tabla 3.3 se muestran los promedios de las eficiencias reportadas en al menos dos artículos para cada una de las combinaciones.

Tabla 3.3 Resumen de las eficiencias de remoción reportadas en la literatura

Proceso \ Parámetro	Zeolita	Carbón Activado	Membrana Ultrafiltración	Membrana Ósmosis Inversa
Arsénico	90	70	75-80	84-99
Boro	-	90	70	69-95
Cadmio	90	90	75-80	99
Cobre	95	90	65-75	95-99
Cromo	85	-	75-80	99
Hierro	95	-	-	90
Manganeso	95	95	50-70	-
Níquel	90	80	80-85	95-98
Plomo	95	75-85	80-85	70-98
Zinc	80	65-80	75-85	95
Fluoruros	60-80	80-90	-	70-90
Cianuros totales	-	60-85	65-70	60-80
Fenoles totales	60-90	60-70	10-20	40-95
Nitratos (nitrógeno de)	65-80	60	80	50-96
Sulfatos	-	65	-	85

De la tabla 3.3 se puede concluir que:

- I. La zeolita por sus propiedades fisicoquímicas presenta altas eficiencias de remoción de metales, actuando como un intercambiador iónico
- II. El carbón activado presenta eficiencias del 60-90% para todos los parámetros
- III. La membrana de ultrafiltración tiene valores un poco menores, pero la función principal de dicha membrana es proteger a la membrana de ósmosis inversa

- IV. La membrana de ósmosis inversa reporta los valores de remoción más altos, además de ser la última barrera (antes de la ozonación) en la planta prototipo a prueba en esta investigación, con la cual se estaría asegurando la calidad del efluente.

3.5 Monitoreo y calidad del agua

En esta sección se revisarán los procedimientos de seguimiento y control de operación que se utilizan en los sistemas de reúso, concretamente en los casos revisados anteriormente. Una de las plantas que tienen mayor antigüedad y por lo tanto se cuenta con mayor información, además de ser la única que actualmente realiza Reúso Potable Directo, es la planta de Goreangab (Nueva) que se encuentra en Windhoek, Namibia.

Monitoreo y control de calidad

La ciudad de Windhoek tiene dos fuentes principales de abastecimiento, la primera es la planta de potabilización de Von Bach-Swakoppoort-Omatoko que toma agua superficial y subterránea de la cuenca Omaruru y tiene una capacidad de 59,600 m³/d y la segunda es la Nueva Planta de Reúso de Goreangab con una capacidad de 14,400 m³/d; además recibe agua de alrededor de 60 pozos (Menge and Slabbert, 1999).

El monitoreo es una parte integral del reúso del agua para asegurar la calidad de las fuentes de agua potable y para mantener la confianza de la gente. El monitoreo se hace durante todo el ciclo de tratamiento. Los parámetros de prueba para cada punto de muestreo son determinados ya sea por funcionalidad y/o implicaciones a la salud (Menge and Slabbert, 1999). Las pruebas de rutina incluyen: parámetros físicos, químicos orgánicos e inorgánicos, microbiológicos e indicadores virales. Todas las pruebas se realizan en el laboratorio de la ciudad de Windhoek.

El programa de control de riesgo sanitario incluye pruebas avanzadas, que son realizadas en laboratorios externos. Los programas son vinculados a proyectos de investigación. Las pruebas que se realizan incluyen: virología, parasitarias, toxicidad, mutagenicidad, disruptores endócrinos, ftalatos, pesticidas, algas, etc (Du Pisani, 2005).

La instrumentación en línea y roles de muestreo juegan un papel importante en Windhoek. La planta de Goreangab está totalmente automatizada e instrumentos en línea están colocados a lo largo de todo el proceso para un control continuo. Además, se instaló instrumentación en los efluentes de las plantas de tratamiento que abastecen a la planta de reúso y en los embalses naturales principales

para un mejor control. Esta instrumentación comprende principalmente: turbiedad, pH, conductividad, oxígeno disuelto, cloro residual, UV, COT, sólidos suspendidos. El muestreo en línea se compone de 24 tomas de muestra y filtros para Giardia/Crypto y virus (Du Pisani, 2005).

Pruebas piloto

Debido al veloz desarrollo de nuevas tecnologías para la potabilización de agua residual y el poco registro histórico de los datos obtenidos con estas tecnologías, es recomendable realizar pruebas a escala piloto permanentes en el diseño de los procesos de tratamiento para el RPD. En adición a la evaluación y validación de nuevas tecnologías, los resultados a nivel piloto pueden ser utilizados para investigar problemas operacionales y problemas de viabilidad que pudieran surgir en operaciones a escala completa. Algunas consideraciones al establecer un programa de planta piloto podrían ser: (1) comprender claramente la razón de llevar a cabo este tipo de pruebas (predicción del desempeño de los procesos y confiabilidad), (2) la escala de la planta piloto que se requiere para obtener resultados confiables, (3) factores de diseño físicos, (4) desarrollo de un programa de pruebas y (5) considerar el grado de innovación, la complejidad de los procesos y los materiales de construcción (Tchobanoglous et al., 2011).

Monitoreo y constituyentes de la detección

A pesar de que ha habido un número creciente de mejoras en el monitoreo en línea y detección de componentes, hoy en día aún no es viable proveer un monitoreo en tiempo real de todos los componentes involucrados. De cualquier forma, la identificación de otros indicadores puede ser utilizada para evaluar la eficiencia de unidades de proceso clave que nos permitan obtener medidas de todos los factores de interés.

Tipos de monitoreo

Existen dos tipos básicos de monitoreo que se pueden aplicar: en tiempo real y evaluación individual en laboratorio. Los medidores en tiempo real son utilizados para un monitoreo constante de datos de calidad del agua o en otros procesos donde los parámetros son usados para evaluar el desempeño de unidades de proceso individuales. Por ejemplo, en los procesos de membrana se incluye monitoreo en tiempo real de: presión, tamaño de partícula, sólidos suspendidos, absorbancia de UV y COT para asegurar la integridad de la membrana (Drewes et al., 2010). Medidas off-line se llevan a cabo en el laboratorio para verificar los datos obtenidos por el monitoreo en tiempo real y para una caracterización detallada de componentes específicos.

La figura 3.10 presenta un esquema en general de los procesos utilizados en los proyectos de RPD en Estados Unidos y de cómo se lleva a cabo el monitoreo y seguimiento de los parámetros de interés (Tchobanoglous et al., 2011).

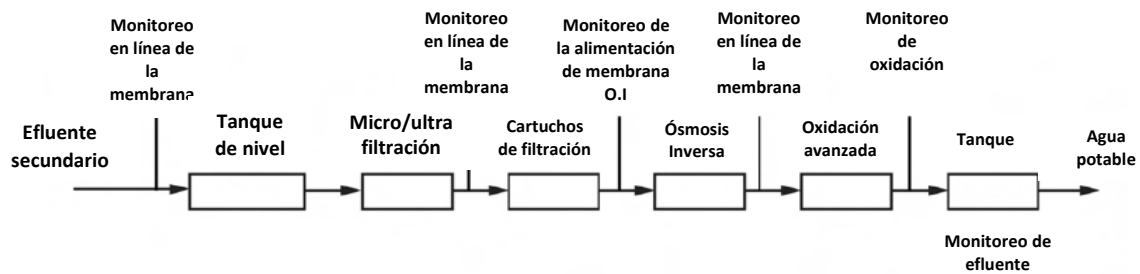


Figura 3.10 Localización de los puntos de muestra (Tchobanoglous et al., 2011)

La rutina de muestreo utilizada en la planta de Denver (The Denver Project Technical Report) presenta la frecuencia de muestreo y el número mínimo de análisis que se realizaban en la planta. Estos resultados a menudo demostraban la necesidad de llevar a cabo pruebas especiales. Por ejemplo, las muestras que se tomaban cada hora en ciertos procesos fue necesario aumentarlas para explorar los efectos de posibles fluctuaciones diarias. Además, muestras especiales a la salida de cada proceso fueron requeridas. Adicionalmente, el programa fue diseñado para darle a los analistas suficiente tiempo para realizar los estudios avanzados además de los análisis de rutina (Lauer, 2015).

CAPÍTULO 4. MÉTODO EXPERIMENTAL

En este capítulo se revisan los antecedentes de esta investigación, el modo de operación de la planta y los resultados entonces obtenidos para describir el procedimiento experimental de esta tesis. Además, se investigaron dos fuentes de abastecimiento las cuales resultan interesantes para su evaluación de acuerdo con los objetivos planteados. Adicionalmente se esboza el diseño experimental donde se incluyen las dos fuentes y las réplicas necesarias para la confiabilidad de los resultados, concluyendo con un análisis estadístico de los resultados.

4.1 Antecedentes de esta investigación

El trabajo de investigación de esta tesis es una continuación de un proyecto de maestría concluido en 2016 que lleva por título “Evaluación del riesgo microbiológico y químico del reúso indirecto de agua residual para consumo humano con base en el tratamiento por barreras múltiples” (Martínez, 2016); en dicho proyecto se diseñó y se puso en operación el prototipo que se utilizó en el presente trabajo.

Las barreras de las que consta el prototipo son las siguientes (Fig. 4.1):

- El primer sistema, de pretratamiento, está formado por tres filtros: uno de grava y arena, uno de zeolita y el tercero de carbón activado.
- El segundo sistema de pretratamiento se integra de 2 módulos uno para retener sedimentos y otro de carbón activado y un módulo de ultrafiltración.
- El tercer sistema, de tratamiento avanzado, consta de una membrana de ósmosis inversa y de un filtro de carbón activado.
- El cuarto sistema es una etapa de oxidación con ozono.



Figura 4.1. Prototipo de potabilización

Cabe destacar que en la investigación anterior el trabajo se enfocó a la evaluación del control/reducción del riesgo en cada etapa de tratamiento (figura 4.2) y no en la operación de la planta como procesos avanzados; además, los experimentos se realizaron con muestras sintéticas que emularon las características de un agua problemática proveniente de una fuente no convencional (datos históricos del acuífero del Valle del Mezquital).

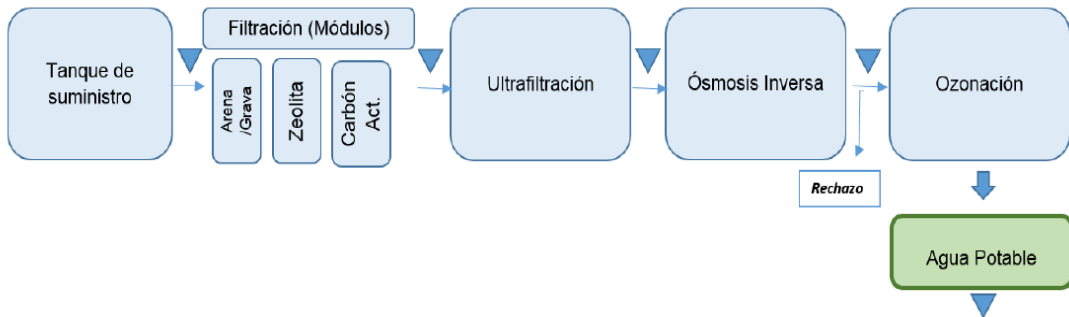


Figura 4.2 Tren de tratamiento del prototipo (T1)

Los resultados de esa investigación se presentan en la tabla 4.1 en la que se observa que el promedio de remoción global obtenido en dicho estudio, de todos los tratamientos a los que se sometió la

muestra sintética, fue superior al 90%. Además, se obtuvieron eficiencias mayores al 99% para casi todos los metales y una total remoción de los organismos patógenos.

Tabla 4.1 Eficiencias de remoción (%) globales obtenidas en el trabajo de investigación anterior (Martínez, 2016)

Parámetro	% Remoción		
	Mínima	Máxima	Promedio
SDT	91.55	100.0	97.45 ± 2.4
Cloruros	87.91	97.79	95.97 ± 1.87
Fluoruros	92.12	98.53	96.29 ± 2.08
Nitratos	85.35	98.42	93.24 ± 3.4
Sulfatos	96.84	99.93	99.59 ± 0.64
Sodio	95.96	99.21	98.05 ± 0.72
Aluminio	96.24	99.99	99.56 ± 0.91
Arsénico	97.60	99.62	99.04 ± 0.76
Cadmio	99.96	100.0	99.99 ± 0.02
Hierro	65.87	99.72	90.42 ± 12.25
Manganeso	97.15	99.91	99.51 ± 0.78
Plomo	99.8	99.97	99.94 ± 0.05
<i>E. coli</i>	100.0	100.0	100 ± 0.0
<i>Ascaris sp</i>	100.0	100.0	100 ± 0.0

Al realizar una comparación entre las eficiencias obtenidas en el trabajo de investigación anterior, y las eficiencias reportadas en la tabla 3.3, se observa una baja eficiencia en general para casi todos los procesos, exceptuando la membrana de ósmosis inversa. Esto podría deberse a que en comparación con los artículos revisados en el capítulo anterior, en general trabajan con muestras dopadas únicamente del contaminante de interés y/o a lo máximo dos o tres componentes. Sin embargo, los valores de la tabla 4.2 reportan las eficiencias obtenidas en una muestra mucho más compleja, simulando condiciones reales, donde se llegaron a tener casi 20 componentes diferentes y por lo tanto no se descarta que las interferencias que pudieran existir, entre otros factores, influyeron en las eficiencias de los procesos.

Tabla 4.2 Eficiencias de remoción (%) por proceso de tratamiento (Martínez, 2016)

Parámetro	% de Remoción			
	Filtración	Ultrafiltración	Osmosis Inversa	Efluente
SDT	0.0	0.0	97.1	97.4
Cloruros	8.5	0.1	93.3	96.8
Fluoruros	15.8	10.5	94.7	96.3
Nitratos	13.2	14.8	89.9	94.1
Sulfatos	4.4	4.5	99.7	99.6
Sodio	0.7	0.5	97.3	98.1
Aluminio	21.6	36.3	98.3	99.7
Arsénico	23.7	47.6	99.6	99.6
Cadmio	9.1	17.5	100.0	100.0
Hierro	0.0	59.7	84.1	90.7
Manganeso	0.0	8.8	99.6	99.4
Plomo	83.4	95.1	99.9	99.9
<i>E. coli</i>	96.2	100.0		
<i>Ascaris sp</i>	90.0	100.0		

4.2 Sitios de estudio

Esta investigación se centra en las fuentes de agua no convencionales (figura 4.3), las cuales representan una de las posibles soluciones a la escasez del agua en un futuro cercano. Se seleccionaron dos fuentes: el Manantial de Cerro Colorado (Valle del Mezquital) y el caudal a la planta potabilizadora La Caldera ubicado en la Delegación Iztapalapa.

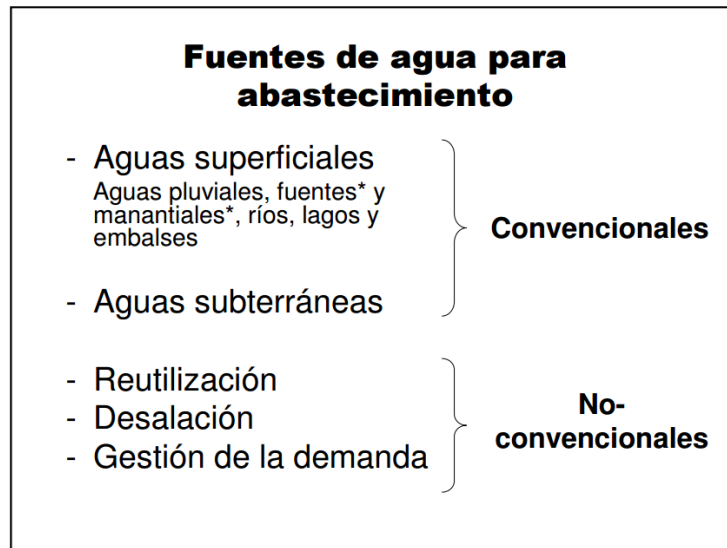


Figura 4.3 Tipos de fuentes de agua para abastecimiento

4.2.1 El Valle del Mezquital, Manantial Cerro Colorado

México es el país latinoamericano que más hectáreas riega con agua residual cruda y se reportan más de 30 escenarios donde la irrigación agrícola depende del agua residual generada en las ciudades (Almanza, 2000). Entre ellos se encuentra el Valle del Mezquital, en Hidalgo, donde existen zonas que se riegan desde hace más de 100 años con el agua residual cruda procedente de la Ciudad de México.

El Valle del Mezquital se encuentra en la parte sureste del estado de Hidalgo, a 50 km al noreste de la Ciudad de México, entre los 20°05' y 20°30' de latitud norte y 99°25' y 98°55' de longitud oeste; en él está localizado el Distrito de Riego 03 (DR03), que a nivel mundial posee la mayor superficie con más tiempo de irrigación (de 20 hasta 99 años) (CNA & BGS, 1995). El DR03 recibe, además, cerca del 70% de los efluentes de la Ciudad de México y áreas conurbanas (figura 4.4). Según estudios realizados (Jiménez, B., Chávez, A., 2004 y Jiménez, B., Chávez, A., Gibson, R., Maya, C., 2011) esta agua presenta altas concentraciones de detergentes, grasas, aceites y metales trazas que inciden sobre los suelos.

Sin embargo, se hace notar que el agua residual que se utiliza cumple generalmente con los límites permisibles establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-1996 (Méndez, 1982; CNA & BGS, 1995). En cuanto a la agricultura, los principales cultivos son hortalizas, legumbres y especias (alfalfa, maíz, trigo, avena, frijol, jitomate, chile y betabel); existiendo una restricción para cultivos de lechuga, col,

cilantro, rábano, zanahoria, espinacas y perejil (aunque se cultivan en la actualidad) y que se debe a la regulación para la reutilización de agua residual para la protección de la salud (Maples, 1990).

El DR03 presenta cuatro series de suelos, Actopan (tipo fluvisoles y feozems háplicos), Tepatepec (vertisoles pélicos y feozems con propiedades vérticas), Lagunilla (fluvisoles y feozems calcáricos) y Progreso (leptosoles y feozems calcáricos con fase petrocálica), distribuidas en todo el distrito (Hernández, *et al.*, 1994), que abarca una extensión de 47,867 ha. Los tiempos de irrigación para cada una de las zonas es diferente, teniendo para la zona I un tiempo promedio de 20 años (tiempos mínimos de 5 y máximos de 32 años); para la zona II un tiempo promedio de 99 años (prácticamente en toda la zona II los tiempos de irrigación oscilan entre 96 y 105 años); y por último, para la zona III dividida en A y B, se tienen tiempos promedios de 87 y 69 años, respectivamente.

La recarga incidental ha ocurrido en tal magnitud y por tanto tiempo que los niveles piezométricos del agua del subsuelo se han elevado considerablemente, de tal manera que hoy en día en sitios donde el agua subterránea se encontraba a 50 m de profundidad, afloran manantiales con gastos de 40 a 600 l/s. Estas nuevas fuentes de agua se han constituido en el único suministro para todas las actividades de la región. Por ejemplo, el manantial de Cerro Colorado con 600 l/s es uno de los más grandes y de él se abastecen los poblados de Mangas, Tezontepec, Ajacuba y San Salvador (Jiménez *et al.*, 1997). **El origen del agua de este manantial, infiltración de agua residual no tratada, le da la característica de fuente de abastecimiento no convencional, razón por la cual se eligió para este estudio.** El exceso de agua en la región se refleja también en los cuerpos superficiales, por ejemplo, el caudal base del río Tula incrementó en casi ocho veces su valor original (de 1.6 m³/s a 13 m³/s) en 50 años (de 1945 a 1995).

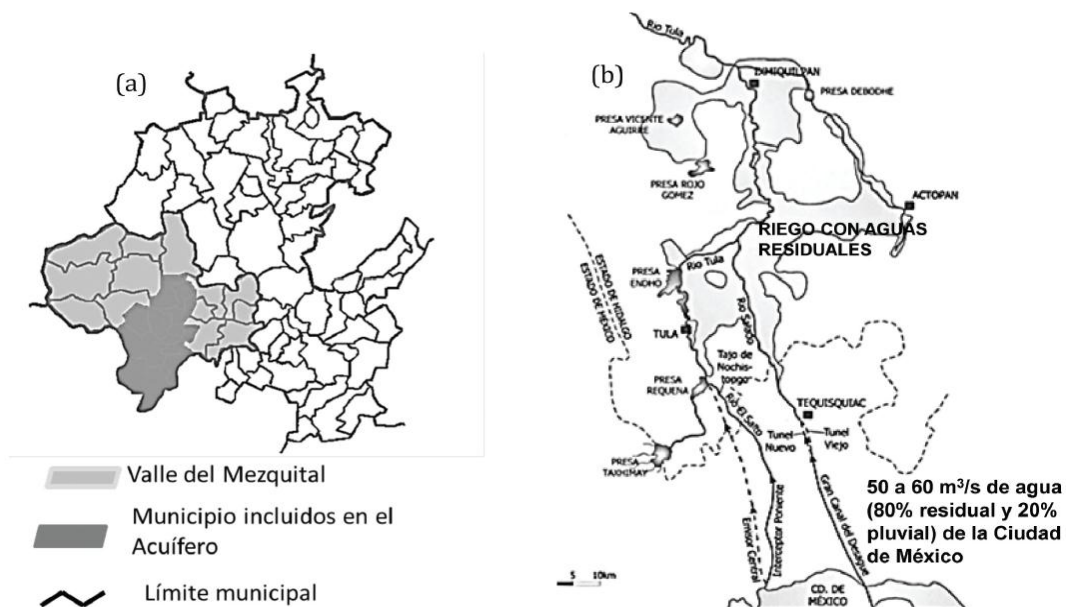


Figura 4.4 Valle del mezquital en el estado de Hidalgo (a) y localización de la zona de riego con agua residual (b)

Uso del agua del subsuelo en el valle de Tula

En el Distrito de Riego 03 hay aproximadamente 380 000 habitantes distribuidos en 294 localidades. La única fuente de suministro de agua para estas personas es la del subsuelo, para lo cual cuentan con 206 pozos y alrededor de 40 norias o manantiales. Así, del subsuelo se extraen 7.4 m³/s, 64% de este volumen para fines industriales (termoeléctrica, la refinería de Tula, las cementeras Cruz Azul y Tolteca), 22% para actividades agropecuarias y 14% para consumo doméstico. Sólo el 55% de las fuentes de suministro municipal son cloradas y 52% se encuentran localizadas en las zonas de riego o cerca de los canales, por lo que reciben la influencia directa de las infiltraciones (Jiménez *et al.*, 1997).

25 m³/s de agua residual (Jiménez, B., Chávez, A., 2004) se infiltra al subsuelo de Tula y recarga el acuífero. La tabla 4.3 presenta los datos sobre la calidad del agua residual a la salida del Valle de México, así como cuando se encuentra ya en el subsuelo de Tula, en puntos representativos del acuífero. Se observa que la remoción varía de acuerdo con el tipo de contaminantes y depende de factores que tienen que ver con el trayecto recorrido por el agua, el tipo y la capacidad de remoción de diversos mecanismos en el suelo y la velocidad de infiltración; en particular se observa una mayor concentración en el efluente que en el influente para los parámetros que tienen que ver con la

salinidad (sólidos disueltos y conductividad) y con los nitratos, los cuales si siguen incrementando comprometerán en un futuro el empleo del agua como fuente de suministro.

Tabla 4.3 Calidad del agua cruda de los emisores Central y del Poniente y de los pozos ubicados en el Valle del Mezquital

<i>Parámetros</i>	<i>Emisores</i>	<i>Teocalco</i>		<i>Tezontepec</i>	
	<i>Promedio</i>	<i>Promedio</i>	<i>Eficiencia</i>	<i>Promedio</i>	<i>Eficiencia</i>
Carbono orgánico total	112	18.0	84	28±28	75
DBO	450	4.0	99	23±52	95
DQO	476	11	99	8.0±7.0	98
Color	140	4	97	5±2.5	96
Nitrógeno amoniacal	28	0.7	98	0.08±0.06	100
Detergentes (SAAM)	6	0.2	97	0.15±0.3	98
Sólidos disueltos	850	945±101	-11	1040	-22
Sólidos suspendidos totales	118	4	97	3.0±4.0	98
Arsénico	0.008	0.002±0.002	75	0.004±0.004	50
Boro	1.1	0.50	53	0.6±0.1	44
Cadmio	0.003	0.002	33	0.002±0.002	33
Cobre	0.07	0.015	77	0.02±0.02	69
Cromo total	0.042	0.004	90	0.004±0.003	90
Dureza total	215	325	-51	455	-110
Hierro	1	0.04	96	0.15±0.32	86
Fósforo	3	0.1	96	0.2±0.2	93
Manganeso	0.09	0.004	96	0.01±0.02	89
Níquel	0.1	0.02	85	0.01±0.02	80
Nitrógeno Total	37	1.5	96	1.6±2.8	96
Plomo	0.09	0.02	77	0.02±0.02	77
Zinc	0.22	0.04	82	0.05±0.1	77
Cianuros	0.009	0.008	11	0.006±0.005	33
Nitratos	0.8	24±27	-2900	18±17	-2150
Sulfuros	3.4	1.2	65	1.0±1.4	71
Coliformes fecales	106	2	4 log	4.0	6 log
Coliformes totales	107	16	6 log	27	7 log
<i>E. histolytica</i>	0.6	ND	100	0	100
Huevos de helmintos	20	0	100	0	100
<i>Salmonella</i>	POSITIVO	ND	100	0	100
<i>Shigella</i>	POSITIVO	ND	100	0	100

Fuente: Jiménez et al., 2003, Jiménez y Chávez, en prensa y Jiménez, 2003.

4.2.2 Caudal a la potabilizadora La Caldera, Iztapalapa

Sistema Mixquic-Santa Catarina

El bombeo del acuífero no confinado en la periferia del acuitardo lacustre en la subcuenca de Chalco se inició a principios de los años cuarenta para uso local agrícola y urbano. Los primeros pozos que se construyeron para proveer de agua potable a la Ciudad de México se perforaron en el acuífero basáltico de las faldas de la Sierra de Chichinautzin y Santa Catarina a principios de los años sesenta (Durazo y Farvolden, 1989).

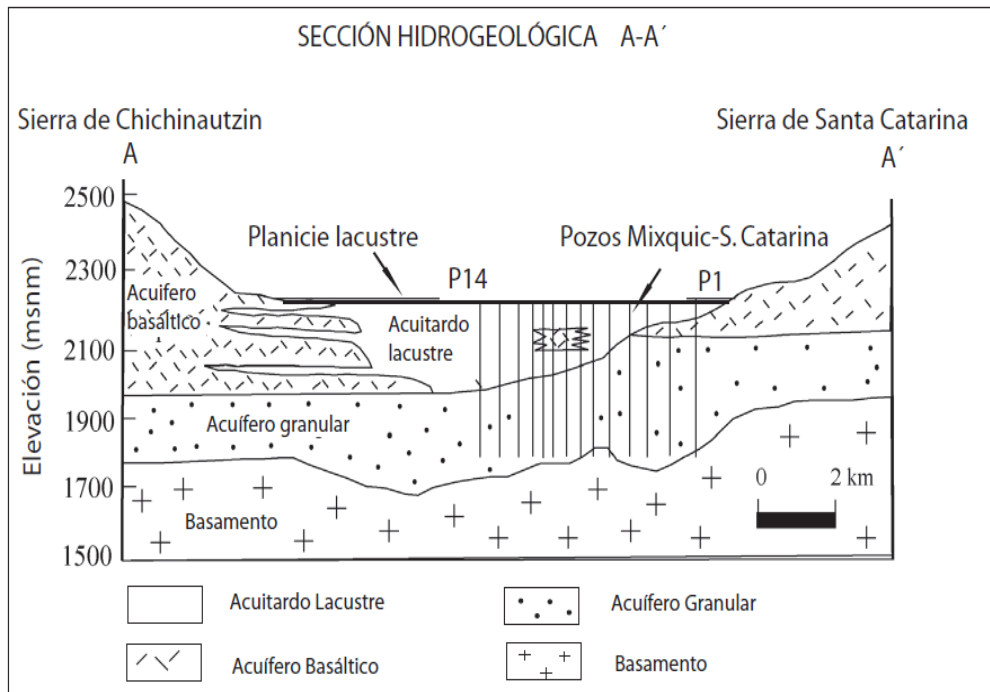


Figura 4.5 Sección hidrogeológica a través de la planicie de Chalco. Se muestra la posición de los sedimentos lacustres (acuitardo) sobre el acuífero granular. La presencia de basaltos provenientes de la Sierra de Chichinautzin y Sierra de Santa Catarina es contemporánea a la sedimentación lacustre (modificado de Ortega et al., 1999)

Catorce pozos profundos, denominados Sistema Mixquic-Santa Catarina, se perforaron en la planicie lacustre de Chalco a profundidades de 400 m, a principios de los años ochenta (Figuras 2a y b), para satisfacer parte de la creciente demanda de agua a la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM). A partir de 1984, estos pozos han aportado entre 1.4 m³/s y 1.75 m³/s a la ZMCM (Ortega et al., 1993). La cantidad total de agua subterránea extraída en la subcuenca de Chalco se estimó en 7.75 m³/s en 1988 (Huízar, 1989) y en 1991 fue estimada en casi 8 m³/s (Ortega et al., 1993), contra una recarga estimada de 6.5 m³/s (Huízar, 1989).

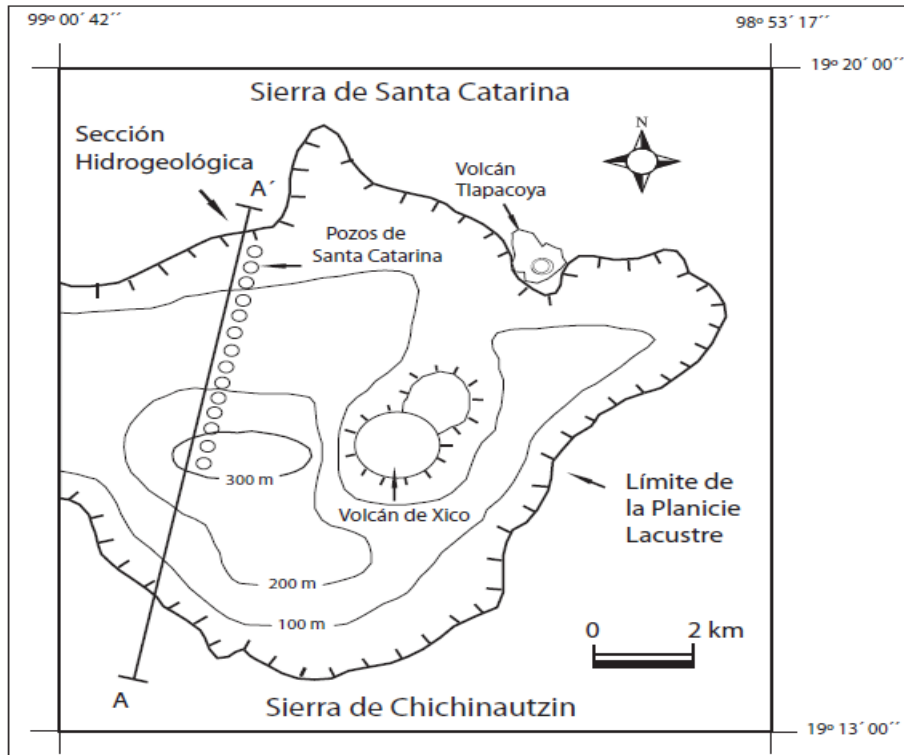


Figura 4.6 Ubicación de los catorce pozos del Sistema Mixquic-Santa Catarina en el interior de la planicie de Chalco. Se muestra la ubicación de la sección hidrogeológica. El espesor de los sedimentos lacustres es de hasta 300 m en el centro de la planicie (modificado de Ortega et al., 1999).

La planta potabilizadora La Caldera se ubica en el kilómetro 22.5 de la autopista México-Puebla, perímetro de la colonia San Francisco Apolocalco, Iztapalapa.

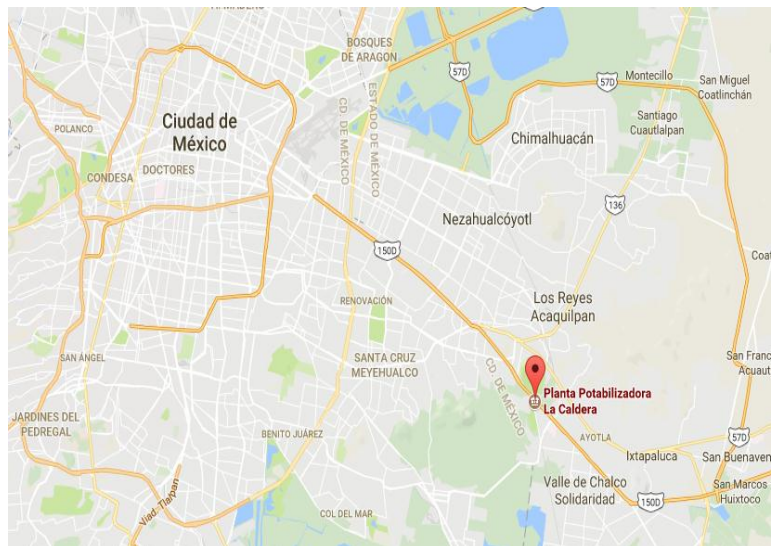


Figura 4.7 Ubicación de la potabilizadora “La Caldera”
Fuente: Google Maps, 2017

Datos de identificación

Nombre de la instalación: La Caldera.

Domicilio: Oriente de la Ciudad de México en km 22.5 Autopista México-Puebla, San Francisco Apolocalco, Delegación Iztapalapa.

Instalación a pie de pozo: no.

Es la potabilizadora más grande de la Ciudad de México con capacidad instalada para tratar 700 l/s.

La elección del caudal que llega a la potabilizadora para las pruebas experimentales de esta tesis se debe a que el agua proviene de diferentes fuentes de abastecimiento (la batería de pozos de tres diferentes ramales) las cuales presentan características diferentes en cuanto a calidad del agua y gastos de extracción variable.

Tabla 4.4 Características de la PP La Caldera

Fecha de inicio de operación de la planta:		2009	
Capacidad instalada:	700 [lps]	Abastecimiento:	Ramal desde Canal de Chalco (CAVM), Ramal Tláhuac-Neza y Ramal Mixquic-Santa Catarina (pozos 1 al 13)
Gasto potabilizado:	580 [lps]		
Población beneficiada:	403 200[hab]	Colonias:	Sierra de Santa Catarina, San Miguel Teotongo, Santiago Acahualtepec.
Costo por inversión inicial:	\$16 600 000		Costo actual de operación: ---

Fuente: CONAGUA, 2014

Tren de Tratamiento

La planta es alimentada con agua proveniente de al menos 14 pozos que integran el Ramal Chalco, a cargo de la Comisión de Aguas del Valle de México, y de los ramales Tláhuac-Neza y Mixquic-Santa Catarina que forman parte del sistema de pozos del Plan de Acción Inmediata (PAI).

Originalmente fue planeada para cumplir con el siguiente proceso: el agua llega al sistema de biofiltración directamente del acueducto con una presión manométrica promedio de 0.4 a 1.6 kg/cm², esta presión es aprovechada para distribuir el agua a las unidades respectivas: 7 biofiltros de lecho sumergido empacado con zeolita natural, cada una con capacidad para recibir 110 lps (CONAGUA,2014); los biofiltros operan a gravedad y el retro lavado es realizado mediante autolimpieza. Posteriormente el agua es conducida al proceso de ozonación que tiene como principal objetivo oxidar los metales presentes; el efluente se envía hacia el sistema de filtración con

arena sílica a 10 torres de filtración, cada una conformada con 4 filtros, dando un total de 40 filtros de tasa constante. Posteriormente el agua pasa al sistema de adsorción con carbón activado, el cual también consta de 12 tanques (figura 4.6), previamente a este paso y sobre la línea de conducción, se le dosifica un polifosfato. Desde el proceso de adsorción, el agua es conducida por una línea hasta una caja rompedora de presión, es en este lugar en donde se le dosifica hipoclorito de sodio para la etapa de desinfección, desde aquí y por gravedad, el agua es conducida hasta el tanque superficial de almacenamiento denominado también “La Caldera”, con capacidad para 50 000 m³, a partir de dicho tanque el agua es enviada a la red para su distribución.



Figura 4.8 Filtros a presión de arena y carbón activado

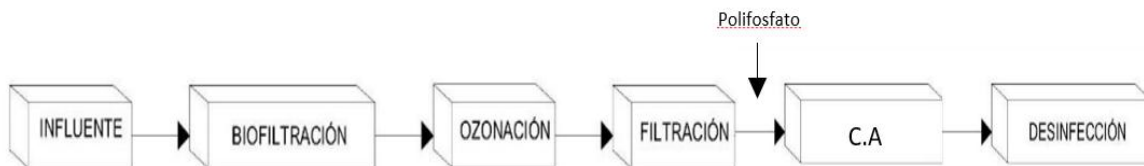


Figura 4.9 Tren de tratamiento potabilizadora “La Caldera”

Problemas operativos

El personal de operación de la planta reporta que los biofiltros no han operado de manera constante desde finales de 2012, lo anterior se atribuye a la calidad del influente el cual presenta elevadas concentraciones de sólidos, lo que ocasiona que los biofiltros se saturen rápidamente.

El tren de tratamiento llegó a operar con dos hidrociclones, con el propósito de separar la mayoría de las partículas sedimentables y posteriormente el agua se mandaba al proceso de cloración para su posterior distribución; las demás partes del tratamiento no se utilizaban. Desde el año 2017 a la fecha, la planta está fuera de operación en espera de un programa de rehabilitación integral, por lo que el caudal promedio de 580 l/s se envía sin tratamiento al tanque de almacenamiento La Caldera, donde sólo se clora antes de ingresar a la red de abastecimiento.

4.3 Parámetros de control de procesos

Para evaluar el comportamiento de los procesos se seleccionaron siete parámetros que serán monitoreados en cada una de las muestras de agua, desde la determinación en el sitio de toma de la muestra hasta el efluente final del prototipo pasando por cada una de las etapas del tren de tratamiento. La selección de estos parámetros se realizó por practicidad ya que en el laboratorio se cuenta con el equipo para medirlos. La determinación de estos siete parámetros servirá para estimar la calidad del agua de una manera general, dado que los resultados de estas pruebas se correlacionan con componentes específicos del agua, los cuales, si fuera el caso, se realizarían pruebas más completas en un laboratorio certificado.

Conductividad: Esta medida indica la facilidad con la que la corriente eléctrica pasa a través del agua. Puesto que el agua pura es muy mala conductora de la corriente eléctrica, las conductividades elevadas indican la presencia de impurezas, y más concretamente de sales disueltas, es una medida indirecta de la cantidad de iones en solución (fundamentalmente cloruro, nitrato, sulfato, fosfato, sodio, magnesio y calcio). La medida de la conductividad resulta muy útil para detectar descargas procedentes de algunas industrias alimentarias y químicas, o infiltraciones de agua del mar en zonas costeras.

Sólidos disueltos totales (SDT): Los sólidos disueltos totales comprenden las sales inorgánicas (principalmente de calcio, magnesio, potasio y sodio, bicarbonatos, cloruros y sulfatos) y pequeñas

cantidades de materia orgánica que están disueltas en el agua. Los SDT presentes en el agua para consumo humano proceden de fuentes naturales, agua residual, escorrentía urbana o de agua residual industrial.

pH: El pH es una medida de acidez o alcalinidad de una disolución. El pH indica la concentración de iones hidrógeno presentes en determinadas disoluciones. En un efluente doméstico alcanza un valor aproximado de 7 u 8.

Potencial de oxidación-reducción: El potencial redox es una forma de medir la energía química de oxidación-reducción mediante un electrodo, convirtiéndola en energía eléctrica. El potencial redox es positivo cuando se produce una oxidación y negativo cuando ocurre una reducción. En la desinfección del agua es muy importante tanto la concentración de cloro libre y el tiempo de contacto con el agua, así como el pH y la temperatura, un buen control de la desinfección exigiría el monitoreo no del cloro libre sino del potencial redox del medio, es decir el potencial de oxidación-reducción (ORP).

La solubilidad de muchos micronutrientes esenciales como el hierro (Fe) y el manganeso (Mn) es afectada por el estado redox de la molécula. Cuando el potencial redox es alto, hierro y manganeso existen en forma trivalente y tetravalente respectivamente (Fe^{3+} ; Mn^{4+}). Estas formas ionizadas son insolubles y no accesibles para el consumo microbiano. Las formas bivalentes de estos metales (Fe^{2+} y Mn^{2+}) se generan a potenciales bajos, son solubles en agua y fáciles de incorporar por los microorganismos.

Generalmente, el potencial redox es afectado por la concentración de oxígeno disuelto. Según baja el potencial redox en agua y sedimentos, se observa una disminución en la concentración de oxígeno disuelto y la reducción de iones y moléculas importantes para la nutrición de microorganismos y formas de vida superior (nutrientes).

Oxígeno disuelto (OD): El análisis de oxígeno disuelto mide la cantidad de oxígeno gaseoso disuelto (O_2) en una solución acuosa. El oxígeno se introduce en el agua mediante difusión desde el aire que rodea la mezcla, por aeración (movimiento rápido) y como un producto de desecho de la fotosíntesis. El nivel de Oxígeno Disuelto (OD) puede ser un indicador de cuán contaminada está el agua y cuán bien puede dar soporte esta agua a la vida vegetal y animal de un determinado ecosistema. Generalmente, un nivel más alto de oxígeno disuelto indica agua de mejor calidad. Si

los niveles de oxígeno disuelto son demasiado bajos, algunos peces y otros organismos no pueden sobrevivir.

El análisis del OD es clave en el control de la contaminación en las aguas naturales y en los procesos de tratamiento de agua residual industrial o doméstica.

Demanda química de oxígeno: La Demanda Química de Oxígeno (DQO) se define como cualquier sustancia tanto orgánica como inorgánica susceptible de ser oxidada, mediante un oxidante fuerte. La cantidad de oxidante consumida se expresa en términos de su equivalencia en oxígeno. La DQO se utiliza con frecuencia como una medida de la cantidad de contaminantes (materia orgánica) en cursos naturales y en otros efluentes. Para muestras de una fuente específica, la DQO puede correlacionarse empíricamente con la DBO (demanda bioquímica de oxígeno), carbono orgánico total (COT) y demanda total de oxígeno.

Carbono orgánico total (COT): En esta prueba se realiza una cuantificación del carbono contenido en la muestra, sin especificar su procedencia química, es decir, el grupo funcional específico del compuesto orgánico.

4.3.1 Pruebas preliminares

Antes de realizar las pruebas correspondientes al diseño del experimento se realizaron una serie de tratamientos preexperimentales para conocer y dominar el funcionamiento y operación de la planta y de esta manera establecer un procedimiento adecuado en el momento de realizar las pruebas experimentales.

Con las pruebas preliminares se pudieron determinar:

- Condiciones de operación
- Tiempo de ejecución de cada tratamiento
- Caudal de rechazo
- Limpieza del prototipo

El porcentaje promedio de rechazo se estimó de 60%, lo cual sirvió para determinar el volumen de muestra requerido para cada tratamiento. También se determinó el tiempo de duración en el que un volumen de 5L recorre todo el tren de tratamiento hasta el almacenamiento en el tanque final,

que es aproximadamente 20 minutos. Finalmente se definió un proceso de limpieza para asegurar un buen funcionamiento de la planta y además evitar errores de medición debido a contaminantes acumulados.

4.3.2 Trenes de tratamiento propuestos

Como se estableció en la primera sección de este capítulo, el tren de tratamiento del prototipo (T1) funcionó de forma eficiente en el proyecto de investigación anterior donde se trabajó con muestras sintéticas. Con base en las eficiencias de remoción observadas en esa investigación (tabla 4.2) y considerando las reportadas en la literatura (tabla 3.3) se seleccionaron dos materiales para la etapa de pretratamiento: una resina de intercambio iónico y arena verde. La inclusión de estos materiales a los cartuchos de filtración podría mejorar la eficiencia en muestras reales de agua provenientes de fuentes no convencionales, que por lo general presentan altos valores de conductividad debido a sales metálicas y no metálicas.

Resina de intercambio iónico: Las resinas de intercambio iónico son naturales o de materiales sintéticos, normalmente esferas de 0.5-1 mm de diámetro, destinadas al tratamiento de agua residual industrial. Están formadas por una matriz polimérica a la que se le han unido una gran cantidad de radicales polares, ácidos o bases. Cuando el agua pasa a través de la resina, ésta toma iones del agua (sodio, cloruro, calcio, magnesio, etc.) y cede una cantidad equivalente en cuanto a carga de protones o de hidroxilos. En este caso se optó por una resina catiónica de sodio de la marca ResinTech, Inc que elimina principalmente la dureza del agua por intercambio de sodio por el calcio y el magnesio ***Consultar anexo, ficha técnica de la resina.**

Sustituyendo la zeolita por la resina, el tren de tratamiento quedaría de la siguiente forma:

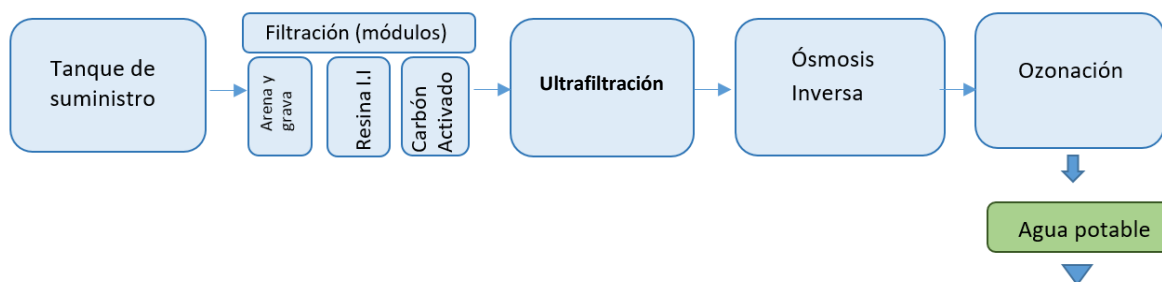


Figura 4.10 Tren de tratamiento acoplado la resina de intercambio iónico (T2)

Arena verde: Además de la resina, otro material que se adicionó al tren de tratamiento fue la *arena verde* la cual es un medio color morado-negro usado para remoción de hierro, manganeso y sulfuro de hidrógeno del agua. También puede remover radio y arsénico. Es procesada con minerales de glauconita y zeolita. El greensand plus* utiliza arena sílica recubierta de dióxido de manganeso que actúa como un catalizador en la reacción de oxidación-reducción del hierro y el manganeso.

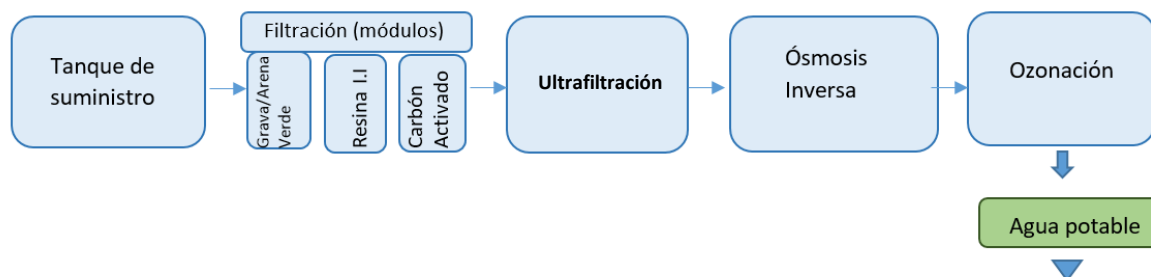


Figura 4.11 Tren de tratamiento acoplado arena verde y la resina de intercambio iónico (T3)

Estos dos métodos de tratamiento, además de asegurar una mejor calidad en el efluente, ayudarán a que la membrana de ósmosis inversa prolongue su tiempo de vida, ya que la saturación por sales disueltas y metales es una de las principales causas de deterioro de la misma.

4.4 Diseño experimental

Las pruebas experimentales iniciaron en el laboratorio utilizando muestras de agua provenientes del sitio de estudio, dado que se trata de evaluar los procesos de un sistema de potabilización avanzado.

Las pruebas utilizaron muestras traídas de dos fuentes diferentes:

- Manantial de Cerro Colorado
- Caudal de la potabilizadora La Caldera

Para cada una de las fuentes se hicieron cinco pruebas experimentales de cada uno de los tres trenes de tratamiento propuestos (figuras 4.2, 4.5 y 4.6).

Y consistieron en la determinación de los siguientes parámetros:

1. Carbono orgánico total
2. Conductividad
3. Sólidos disueltos totales
4. pH
5. Potencial redox
6. Demanda química de oxígeno
7. Oxígeno disuelto

Para cada prueba experimental, estos parámetros se determinaron en 6 muestras de agua, provenientes del influente (1), de la salida de los cartuchos de filtración (2), salida de ultrafiltración (3), salida de ósmosis inversa (4), del efluente final (5) del prototipo y del rechazo de la membrana de ósmosis inversa(6); por duplicado (tabla 4.5).

Tabla 4.5 Diseño experimental primera etapa

Tratamiento	Fuente 1: Cerro Colorado	Fuente 2: La Caldera
T1	5 pruebas por duplicado (a,b)	5 pruebas por duplicado (a,b)
T2	5 pruebas por duplicado (a,b)	5 pruebas por duplicado (a,b)
T3	5 pruebas por duplicado (a,b)	5 pruebas por duplicado (a,b)

Para el caso del manantial de Cerro Colorado, además de contar con valores históricos de los parámetros relacionados a la NOM-127-SSA1-1994 y algunos otros de interés que se han estudiado en investigaciones anteriores, se realizó una caracterización con la NOM-127-SSA1-1994 para saber el estado actual de la calidad del agua en esta fuente y saber que contaminantes se encuentran en mayor cantidad. Estos valores históricos corresponden a una base de datos compuesta por los siguientes datos:

- a) Resultados de las pruebas realizadas para la elaboración del artículo *“Quality assessment of an aquifer recharged with wastewater for its potential use as drinking source: “El Mezquital Valley” case”*, (Jiménez, B., Chávez, A., 2004).

- b) La calidad del agua promedio en tres pozos del acuífero Tarango en el año 2011
- c) Calidad del agua en la primera toma domiciliaria (La Virgen) de la red de suministro del manantial Cerro Colorado, muestreo en estiaje y lluvias; muestras tomadas entre las fechas 18/04/2011 y 26/10/2011.
- d) Además de las correspondientes a este estudio, realizadas entre las fechas 24/03/2017 al 20/04/2017.

Caso contrario del caudal de la potabilizadora “La Caldera”, del cual no se contaba con ninguna información previa, pero de igual forma se realizó el análisis de los parámetros de la NOM-127-SSA1-1994. Las tomas de muestra para la experimentación se realizaron entre el 10 de septiembre y el 15 noviembre del 2017.

4.4.1 Selección del tratamiento óptimo

Una vez establecido un protocolo de trabajo con los tiempos de duración de los experimentos, los volúmenes de agua requeridos y medidas de limpieza para evitar contaminación entre muestra y muestra, se procede a iniciar las pruebas de cada uno de los tratamientos tal como lo describe la tabla 4.5.

Al finalizar la primera etapa de experimentación se selecciona el tratamiento que mejor se adecúa de acuerdo con la fuente, es decir, el cual genere una mejor eficiencia en la remoción de contaminantes relacionados a los parámetros de interés, es entonces cuando la segunda etapa de la experimentación comienza con el tratamiento seleccionado además de ampliar la cantidad de parámetros a analizar, de 7 parámetros a 18:

1. Turbiedad
2. pH
3. Potencial redox
4. Conductividad
5. Color verdadero
6. Sólidos disueltos totales
7. Cloruros
8. Fluoruros
9. Sulfatos
10. Hierro
11. Manganeseo
12. Sodio
13. Nitrógeno amoniacal

- 14. Dureza total
- 15. Salinidad
- 16. Demanda química de oxígeno
- 17. Carbono orgánico total
- 18. Oxígeno disuelto

Tal como se observa en la tabla 4.5, el tratamiento “alfa α ” que para cada fuente será el tratamiento seleccionado por presentar los mejores resultados, será sometido a su vez a cinco pruebas experimentales más, con la diferencia de que los dieciocho parámetros seleccionados serán analizados únicamente en el influente, efluente y el rechazo de la membrana de ósmosis inversa. Cabe destacar que el monitoreo de cada una de las etapas se realiza con los siete parámetros indicados en la primera etapa, pero para obtener un balance total de los contaminantes de interés se realiza la ampliación a los 18 parámetros en la entrada y salidas del sistema.

Tabla 4.6 Diseño experimental segunda etapa

	Fuente1: Cerro Colorado	Fuente 2: La Caldera
Tα	5 pruebas experimentales	5 pruebas experimentales

4.4.2 Muestreo

Antes de iniciar las pruebas en cada una de las fuentes, lo primero que se realizó fue una caracterización completa con todos los parámetros indicados en la NOM-127-SSA1-1994, esto consistió en recolectar la muestra y no dejar pasar más de 24 h entre la recolección y el análisis de la muestra.

El muestreo de la primera etapa se realizó recolectando grandes volúmenes de muestra de hasta 80 litros y posteriormente se realizaron las cinco pruebas experimentales correspondientes a un tratamiento (T1, T2 y T3), una por día. Los cinco días permiten así constatar la reproducibilidad de los experimentos y acudir a muestreo una vez por semana.

La ampliación de parámetros a analizar en la segunda etapa y con la meta de realizar las pruebas con agua lo más fresca posible exigió que cada día de experimentación comenzara con la recolección de muestra por la mañana (30 litros), la prueba experimental por la tarde y análisis de todos los parámetros seleccionados antes de las 24 h.

4.4.3 Análisis de muestras

El análisis de las muestras se realizó de la siguiente forma:

Los siete parámetros iniciales se determinaron en todas las etapas de experimentación, en las instalaciones del Laboratorio de Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería, con ayuda de un medidor portátil de pH/conductividad Thermo Scientific Orion Star A325 para la determinación de conductividad, SDT, pH, potencial redox y oxígeno disuelto; además de la determinación de DQO y COT por el método de digestión por reactor en las seis tomas de muestra con las que cuenta el prototipo. En la segunda etapa de experimentación, además de la determinación de estos siete parámetros en el Instituto, en la tabla 4.7 se enlistan las técnicas reportadas por el laboratorio Intertek + ABC analitic en los dieciocho parámetros analizados únicamente en el influente, efluente y rechazo de la membrana de ósmosis inversa, como se puede observar algunos parámetros se encuentran repetidos ya que se utilizaban para comparar resultados. En la figura 4.10 se puede observar con mayor detalle el procedimiento experimental.

Tabla 4.7 Técnicas utilizadas para la determinación de parámetros

Parámetro	Técnica
Turbiedad	NOM-201-SSA1-2015 A.N. A3.2
pH	NMX-AA-008-SCFI-2011
Potencial redox	US EPA SESDPROC-113-R2
Conductividad	NMX-AA-093-SCFI-2000
Color verdadero (Pt-Co)	NOM-201-SSA1-2015 A.N A3.1
SDT	NMX-AA-034-SCFI-2015
Cloruros	NMX-AA-073-SCFI-2001
Fluoruros	US EPA 9214-1996
Sulfatos	US EPA 9036-1986
Hierro total	US EPA 6010C-2007
Manganeso total	US EPA 6010-2007
Sodio total	US EPA 6010C-2007
Nitrógeno amoniacal	US EPA 350.1-1993
Dureza total	SM 21th 2340C-2011
Oxígeno disuelto	NMX-AA-012-SCFI-2001
Salinidad	NMX-AA-034-SCFI-2015
Demanda química de oxígeno	Digestión por reactor
Carbono orgánico total	Digestión por reactor

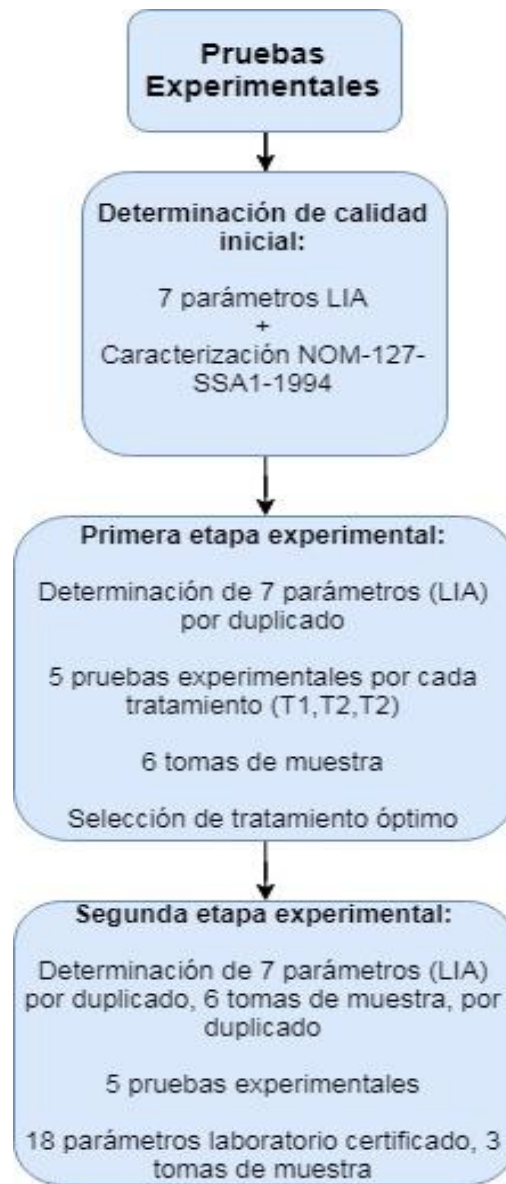


Figura 4.12 Diagrama de flujo del proceso de experimentación

CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados de la investigación, de acuerdo a lo descrito en el capítulo anterior; en primera instancia se muestran los resultados de los valores obtenidos in situ en cada una de las fuentes, únicamente se muestran los valores de los parámetros que exceden la norma. Posteriormente se irán mostrando los resultados obtenidos en cada uno de los tratamientos para cada una de las fuentes.

5.1 Manantial de Cerro Colorado

La tabla 5.1 muestra los valores para los tres parámetros que excedieron la NOM-127-SSA1-1994 en muestras tomadas in situ en la Fuente 1: Manantial de Cerro Colorado, los cuales son: sodio, nitratos y sólidos disueltos totales.

Tabla 5.1 Resumen de los parámetros que exceden la NOM-127-SSA1-1994 en la Fuente 1

Parámetro	Cerro Colorado	NOM-127-SSA-1994
Sodio (mg/L)	230	200
Nitratos (mg/L)	16	10
SDT (mg/L)	1200	1000

La tabla 5.2 muestra los valores para los tres parámetros que excedieron la norma en muestras tomadas justo antes de iniciar la prueba en la planta piloto, los cuales son: sodio, nitratos y sólidos disueltos totales; también se puede observar que, a la salida de la prueba, el efluente, cumple ampliamente la norma.

Tabla 5.2 Comparación de parámetros, influente, efluente y límites permisibles

Parámetro	Cerro Colorado	NOM-127-SSA-1994	Efluente
Sodio (mg/L)	230	200	6.5
Nitratos (mg/L)	16	10	1.1
SDT (mg/L)	1200	1000	ND*

* ND = No detectable

La tabla 5.3 ofrece mayor detalle de cómo se van removiendo los contaminantes a través de cada uno de los procesos de la planta piloto; resultan de especial interés los tres parámetros mencionados anteriormente y observar su disminución gradual, aunque la filtración y la

ultrafiltración prácticamente no participan en la remoción, sin embargo, al llegar a la membrana de ósmosis inversa los contaminantes se remueven casi al 100%.

Se realizaron las pruebas por duplicado en laboratorio para agua real proveniente del manantial Cerro Colorado con el esquema de tratamiento indicado en la figura 5.1. Los resultados obtenidos se integraron en la tabla 5.3 donde se reportan los parámetros de mayor interés y que se saben están presentes en el influente considerados en la NOM-127-SSA1-1994, para cada uno de los 6 puntos de muestreo programados en la metodología.

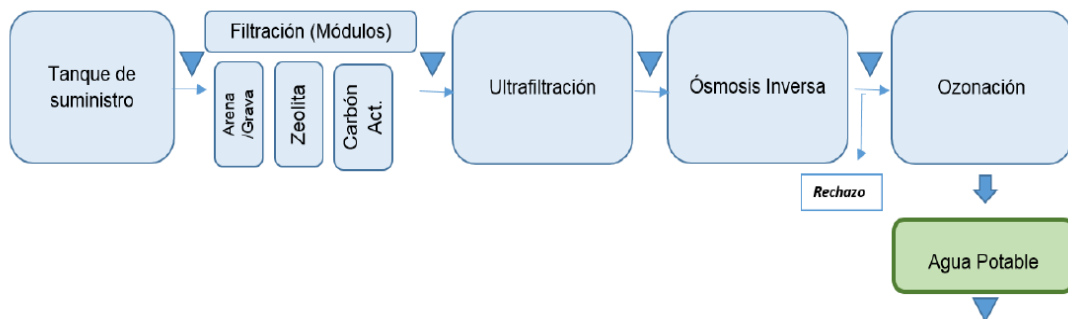


Figura 5.1 Tren de tratamiento del prototipo (T1)

Estos resultados demuestran que a pesar de que se puede considerar que el paso de agua residual a través del suelo del Valle del Mezquital proporciona un “tratamiento natural”, al emerger en alguno de los numerosos manantiales de la zona no se encuentra completamente limpia. Además, estos resultados, indican que el esquema de tratamiento T1 es suficiente para tratar el agua de la fuente 1 (Manantial de Cerro Colorado) y por lo tanto no resulta de interés continuar con las pruebas de tratamiento para los trenes T2 y T3.

Tabla 5.3 Resultados del tratamiento de agua real proveniente del Manantial de Cerro Colorado (Valle del Mezquital)

PARAMETRO	Unidades	Influyente		Filtración		Ultrafiltración		Ósmosis inversa		Efluente		Rechazo de O.I		Límite permisible
		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	
Bacteriológicas														
Coliformes fecales (NMP)	NMP/100mL	>8	>8	8	>8	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausencia
Coliformes totales (NMP)	NMP/100mL	>8	>8	>8	>8	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	-	Ausencia
Organolépticas														
Color verdadero (Pt-Co)	U Pt/Co	3	3	ND	ND	3	ND	3	3	3	3	3	ND	20
Metales														
Arsénico	mg/L	0.0189	0.0173	0.0165	0.018	0.0183	0.0139	ND	ND	ND	ND	0.0232	0.026	0.025
Bario	mg/L	0.113	0.1117	0.0941	0.094	0.0965	0.0975	ND	ND	ND	ND	0.1307	0.1376	0.7
Sodio	mg/L	198.53	214.27	194.59	203.4	228.86	206.07	6.8303	6.6491	6.4296	6.5034	280.21	290.01	200
Orgánicos														
Fenoles totales	mg/L	0.0008	0.0022	ND	ND	0.0004	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.3
Trihalometanos totales	mg/L	2.27	2.37	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	200
Fisicoquímicos														
Cianuros totales	mg/L	0.001	0.001	0.001	0.001	ND	0.001	ND	ND	ND	ND	0.001	ND	0.07
Cloruros	mg/L	167.7	167.7	167.7	167.7	168.7	168.7	ND	ND	ND	ND	212.4	248.2	250
Dureza total	mg/L CaCO ₃	412	429	425	429	416	421	ND	ND	ND	ND	631	643	500
Fluoruros	mg/L	0.7886	0.8123	0.7689	0.727	0.7539	0.8005	0.0079	ND	0.0103	0.009	1.0669	1.1244	1.5
Nitratos	mg/L	17.12	16.654	15.042	16.16	15.965	17.196	1.094	1.138	1.056	1.232	19.758	21.597	10
Nitritos	mg/L	0.0133	0.0137	0.0103	0.011	0.0092	0.0092	0.0018	0.0019	0.0007	0.007	0.0134	0.013	1
Nitrógeno amoniacal	mg/L	0.0751	0.0227	0.0269	0.021	0.0399	0.0307	0.0435	0.0359	0.064	0.048	0.0997	ND	0.5
SDT	mg/L	1238	1204	1190	1190	1198	1222	ND	ND	ND	ND	1768	1802	1000
Sulfatos	mg/L	173.6	150.4	173	179.3	164.4	182.1	1.4	2.7	0.6	ND	275.5	267.1	400

*ND: No detectable, por debajo del límite de detección.

Debido a las características de la fuente que en general presentó bajas cantidades de metales, exceptuando sodio, y una alta presencia de sólidos disueltos, el tren de tratamiento T1 resultó altamente eficaz para obtener un efluente que cumpliera con los parámetros establecidos por la NOM-127-SSA1-1994. El tren de tratamiento se diseñó de tal forma que los contaminantes se vayan eliminando gradualmente en cada una de las etapas debido a sus características físicas y químicas, lo cual permite el funcionamiento óptimo de los procesos lo que se puede ejemplificar con la membrana de ósmosis inversa que es una etapa crucial en el tren de tratamiento debido a sus características particulares y si se colocara como primer tratamiento, aunque seguramente se obtendría una buena eficiencia, la durabilidad de la membrana sería muy corta.

La tabla 5.4 resume algunos parámetros importantes y en ella se observa con mayor claridad la eficacia que tiene cada una de las etapas en la remoción de los mismos. Además esta tabla muestra algunos parámetros con valores no detectables y en consecuencia sin porcentaje de remoción pero se decidió conservarlos debido a que esto permite hacer una comparación con la tabla 4.2, correspondiente a los antecedentes de esta investigación y en la cual se trabajó con muestras elaboradas en el laboratorio con concentraciones conocidas de estos mismos parámetros basados en datos históricos. En general la etapa de filtración y ultrafiltración desempeñan un papel menor en la remoción, pero cumpliendo su papel de protección a la membrana de ósmosis inversa para ambos casos.

Tabla 5.4 Eficiencias de remoción promedio (%)

Parámetro	Inicio (mg/L)	Filtración	Ultrafiltración	Ósmosis inversa	Efluente	Final (mg/L)
SDT	1238	2.54	0.90	99	99	ND
Cloruros	167.7	-	-	99	99	ND
Fluoruros	0.7886	6.57	2.90	99.51	98.79	0.01
Nitratos	17.12	7.60	1.82	93.39	93.23	1.056
Sulfatos	173.6	8.73	0.00	98.73	99.63	ND
Sodio	198.53	3.58	0.00	96.73	96.87	6.42
Aluminio*		-	-	-	-	
Arsénico	0.0189	6.08	11.05	100	99	ND
Cadmio*		-	-	-	-	
Hierro*		-	-	-	-	
Manganeso*		-	-	-	-	
Plomo*		-	-	-	-	
Coliformes totales*		-	-	-	-	

* La concentración de estos parámetros en el influente fue menor al límite de detección

Para finalizar se analizan las eficiencias globales de ambos estudios (tabla 5.5) para constatar que el efluente final para ambos casos presenta una remoción de contaminantes mayor al 95% en todos los parámetros exceptuando nitratos (93%) aunque esto no afecta el cumplimiento de la normatividad vigente. Esto además brinda cierta seguridad con respecto a la variabilidad que pudiera presentar la fuente, esto se pudo observar al consultar los valores reportados desde hace 20 años hasta el presente trabajo, puesto que hay que considerar que tratándose de fuentes naturales la concentración de contaminantes depende de una gran cantidad de factores.

Tabla 5.5 Comparación de las eficiencias de remoción globales

% de Remoción Global		
Parámetro	2018	2016
SDT	99	97.45
Cloruros	99	95.97
Fluoruros	98.79	96.29
Nitratos	93.23	93.24
Sulfatos	99.63	99.59
Sodio	96.87	98.05
Aluminio	-	99.56
Arsénico	99	99.04
Cadmio	-	99.99
Hierro	-	90.42
Manganeso	-	99.51
Plomo	-	99.94
<i>E. coli</i>	-	100
<i>Ascaris sp</i>		100

Los resultados obtenidos son un claro ejemplo de que la combinación de procesos avanzados en el orden adecuado es una alternativa viable en la potabilización de las nuevas fuentes de abastecimiento.

5.2 Caudal planta potabilizadora “La Caldera”

A su vez para la fuente 2 al iniciar las pruebas para seleccionar el mejor tratamiento también se realizó una caracterización inicial y así poder comparar los resultados con la NOM-127-SSA1-1994.

Tabla 5.6 Parámetros de interés en la Fuente 2: Caudal planta potabilizadora “La Caldera”

Parámetro	Influente “La Caldera”	NOM-127-SSA-1994
Color verdadero (U Pt/Co)	25	20
Hierro (mg/L)	0.56	0.3
Manganeso (mg/L)	0.425	0.15
Sodio (mg/L)	249.84	200
Cloruros (mg/L)	154	250
Dureza total (mg CaCO ₃ /L)	282	500
Fluoruros (mg/L)	0.352	1.5
Nitrógeno amoniacal (mg/L)	6.46	0.5
SDT (mg/L)	850	1000
Sulfatos (mg/L)	25.03	400

A pesar de que no todos los parámetros que se presentan en la tabla 5.6 exceden los valores establecidos por la NOM-127-SSA-1994, resultan de especial interés para esta investigación debido a que como se mencionó anteriormente la fuente de alimentación a la potabilizadora La Caldera proviene de al menos 14 pozos diferentes lo cual provoca una alta variabilidad en la calidad del agua, por lo tanto aunque algunos de estos parámetros no excedieron la NOM-127-SSA-1994 cuando se tomó la muestra, sí se encuentran cerca de los límites permisibles y no se descarta en esta investigación la posibilidad de que en algún momento pudieran llegar a superarlos.

Selección de tratamiento óptimo

Para determinar cuál sería el mejor tratamiento para la Fuente 2, se realizaron todos los experimentos indicados en la tabla 4.4 que corresponden a los trenes de tratamiento T1, T2 y T3. Los resultados que se presentan en la figura 5.2 corresponden a los porcentajes de remoción promedio obtenidos en la etapa de filtración, donde la diferencia entre los trenes radica precisamente en dicha etapa ya que para T1 se tiene arena y grava, zeolita y carbón activado; para T2 se cambió la zeolita por resina de intercambio iónico y para T3 además se cambió la arena por arena verde quedando: arena verde y grava, resina de intercambio iónico y carbón activado.

En la figura 5.2 se puede observar que en general el tren T2, con la incorporación de la resina de intercambio iónico resultó ser el más consistente durante las cinco pruebas experimentales además de presentar buenas remociones, esto sucedió en todo el rango de parámetros analizados. A partir de estos resultados se eligió el tren T2 para la segunda etapa experimental.

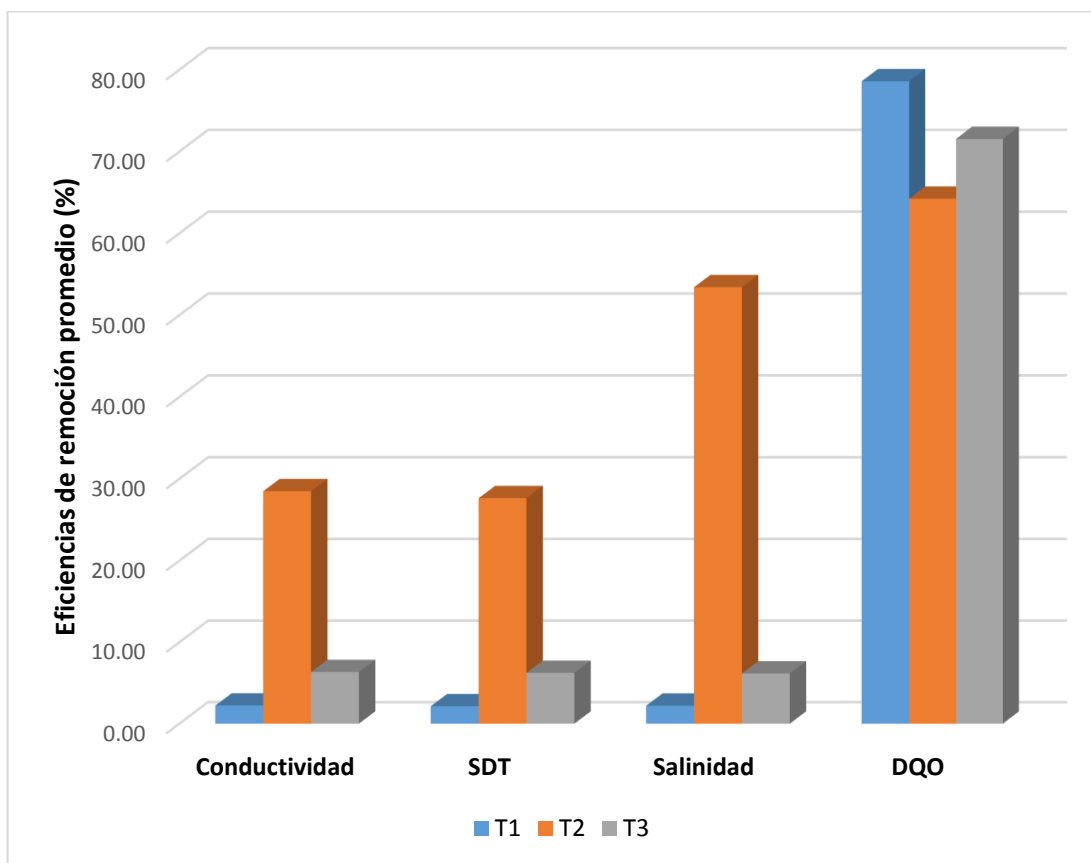


Figura 5.2 Comparación de las eficiencias de remoción para cada uno de los trenes de tratamiento

Segunda etapa

La tabla 5.7 presenta los resultados obtenidos en la segunda etapa de experimentación, la cual consistió en realizar cinco pruebas experimentales con el tren T2, aumentar el número de parámetros a analizar y realizar un análisis a la salida de cada una de las etapas de tratamiento.

Tabla 5.7 Resultados de la primera prueba experimental a la salida de cada etapa de tratamiento

Parámetro	Unidades	Influyente	Filtración	UF	O. I	Efluente	Rechazo de O.I
Cloruros	mg/L	177	161	174	13	13	115
Color verdro (Pt-Co)	U Pt/Co	25	18	13	2.50	3	2.5
Dureza total	mg/L CaCO ₃	253	120	109	20	20	199
Hierro	mg/L	1.48	0.31	0.02	0.01	0.03	0.04
Fluoruros	mg/L	0.35	0.34	0.33	0.01	0.01	0.25
Manganeso	mg/L	0.47	0.01	0.01	ND	ND	0.03
Sodio	mg/L	161.80	253.10	264.10	8.10	4.45	448.40
Nitrógeno amoniacal	mg/L	7.31	2.97	3.19	0.19	0.12	1.47
SDT	mg/L	928.00	894	952	30	30	646
Sulfatos	mg/L	32.16	28.23	35.53	4.67	1.87	21.20
Turbiedad	UTN	3.30	2.10	0.40	0.2	0.25	0.25
pH	U de pH	7.80	8.19	8.31	7.13	7.04	8.44
Conductividad	μS/cm	704.10	1455	1468	38.10	25.38	2412
DQO	mg/L	28.20	18.10	15.90	0.10	ND	22.3
COT	mg/L	8.50	6.70	8.60	0.10	ND	11.3

Se calcularon las eficiencias de remoción de cada una de las etapas, la tabla 5.8 muestra estos porcentajes.

Tabla 5.8 Eficiencias de remoción (%) por etapa. 1ª Prueba

Parámetro	Inicio (mg/L)	Filtración	UF	O.I	Efluente	Final (mg/L)
Cloruros	177	9.04	1.69	92.66	92.66	13
Color verdadero (Pt-Co)	25	28.00	48.00	90.00	88.00	3
Dureza total	253	52.57	56.92	92.09	92.09	20
Hierro	1.48	79.17	98.41	99.26	97.76	0.03
Fluoruros	0.35	2.92	4.75	98.28	98.28	0.01
Manganeso	0.47	97.47	97.26	99.98	99.98	ND
Sodio	161.80	56.43	63.23	94.99	97.25	4.45
Nitrógeno amoniacal	7.31	59.37	56.36	97.40	98.36	0.12
SDT	928.00	3.66	2.59	96.77	100.00	30
Sulfatos	32.16	12.22	10.48	85.48	94.19	1.87
Turbiedad	3.30	36.36	87.88	95.74	92.42	0.25

Además, para facilitar la visualización de estos resultados se realizó una gráfica (figura 5.3) con la finalidad de observar las eficiencias que tuvieron las etapas de tratamiento. Se puede observar que, para el caso de dureza total, hierro, manganeso, sodio y nitrógeno amoniacal la remoción en el proceso de filtración es superior al 50%. Sin embargo, esto no se observó en los cloruros, fluoruros, SDT, sulfatos, turbiedad, DQO y COT aunque sí existe remoción. Esto comprueba la selección del T2 que incorpora la resina catiónica y su correcto funcionamiento, reteniendo los cationes y cumpliendo su función de proteger a las membranas y en específico a la membrana de ósmosis inversa. Por otra parte, se hace notar que, por el funcionamiento de la resina de intercambio iónico, al retener los cationes mencionados ésta libera iones de sodio, sin embargo la función de protección a las membranas se cumple puesto que los iones de sodio son más solubles y no forman incrustaciones.

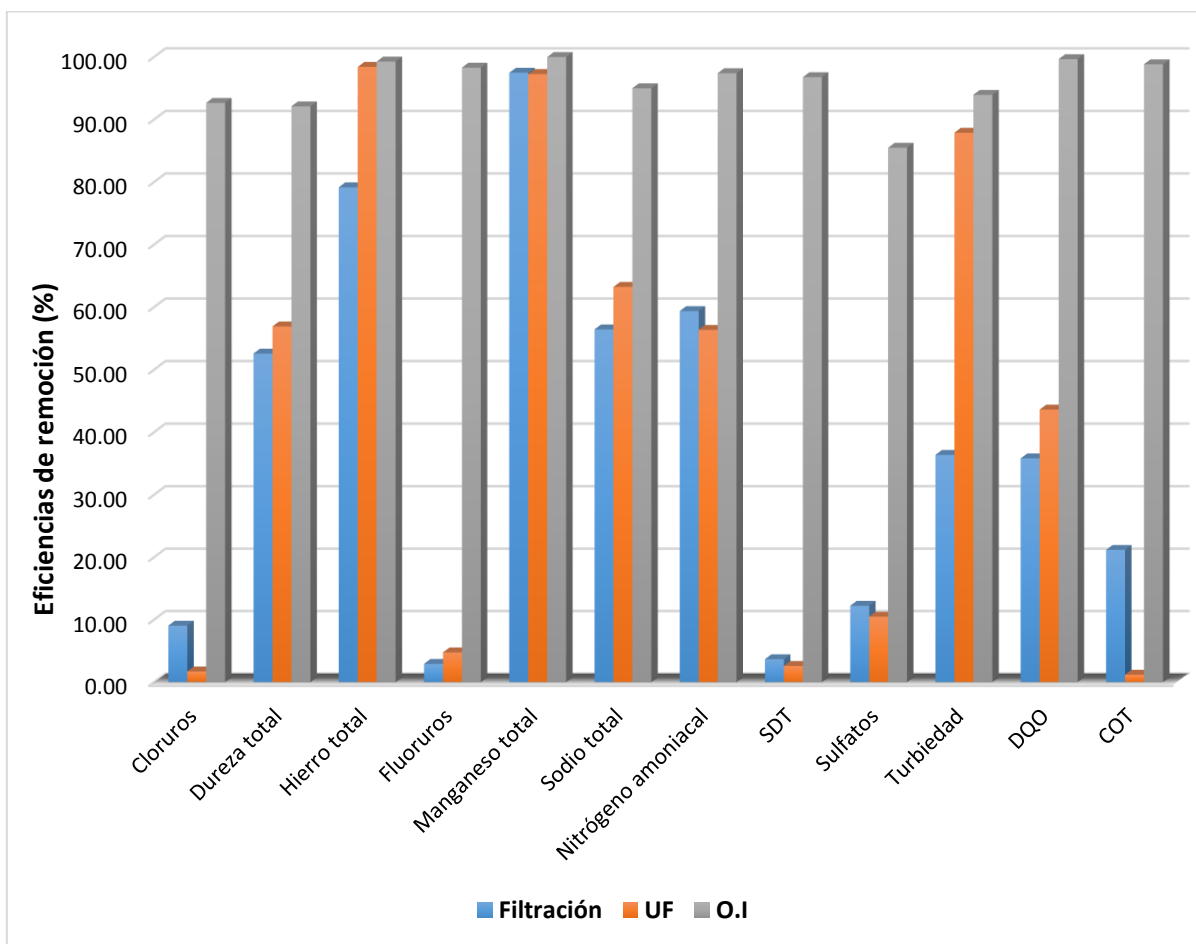


Figura 5.3 Eficiencias de remoción en cada una de las etapas del tratamiento 2

Para las cuatro réplicas siguientes se analizaron muestras de agua del influente y efluente de la planta piloto y rechazo de la membrana de ósmosis inversa; ampliando así la cantidad de datos obtenidos y así poder elaborar una base de datos que permitiera un análisis más extenso sobre el comportamiento y eficiencia de la planta piloto. Para saber la cantidad de contaminantes que el sistema retiene, se hizo un balance de los componentes se sabe son retenidos, ya sea en los cartuchos de filtración, así como en las membranas.

En la tabla 5.9 se puede observar la cantidad de contaminantes que el tren de tratamiento T2 es capaz de depurar o de acumular. Los SDT, sulfatos, cloruros y fluoruros que en su mayoría se encuentran en el rechazo de la membrana de ósmosis inversa; y dureza total, hierro, manganeso y nitrógeno amoniacal acumulados en la resina. La cantidad de sodio en el rechazo de la membrana es muy alta debido a que la resina de intercambio iónico libera sodio al capturar otros cationes, en consecuencia, la salida de sodio es mayor que la entrada. La tabla 5.9 muestra un balance de materia obtenido utilizando el promedio de los parámetros de las cinco réplicas realizadas en los tres puntos de tomas de muestra (influyente, efluente y rechazo). Con esta tabla también se comprueba la

presencia de materia orgánica y su eficaz remoción debido a su presencia en el rechazo de la membrana de ósmosis inversa.

Tabla 5.9 Balance de contaminantes* en el tren de tratamiento T2

Parámetro	Promedio (mg/min)			
	Influyente	Efluente	Rechazo	Balance
Cloruros	48.950	1.225	41.550	6.175
Dureza total	61.950	2.575	16.275	43.100
Fierro total	0.396	0.001	0.003	0.392
Fluoruros	0.085	0.001	0.070	0.015
Manganeso total	0.114	0.000	0.015	0.099
Sodio total	52.757	0.672	72.408	-20.324
Nitrógeno amoniacal	1.542	0.021	1.061	0.460
SDT	240.100	3.825	190.600	45.675
Sulfatos	7.687	0.266	6.952	0.469
DQO	5.313	0.000	2.191	3.122
COT	3.013	0.022	1.338	1.653

*Se consideró un flujo de 0.25 L/min en el influente y 0.125 en efluente y rechazo (50%).

Finalmente se calcularon las eficiencias de remoción para cada una de las cinco réplicas, en la tabla 5.10 se observan las eficiencias mínimas y máximas obtenidas que muestran la consistencia en la respuesta del tren de tratamiento T2; es de especial interés notar que el promedio de casi todos los parámetros es mayor al 95%, exceptuando cloruros, dureza total y sulfatos.

Tabla 5.10 Eficiencias de remoción (%)

Parámetro	Réplicas					% Remoción		
	R1	R2	R3	R4	R5	Mínima	Máxima	Promedio
Cloruros	94.92	93.26	95.34	95.83	95.50	93.26	95.83	94.97
Dureza total	92.09	92.09	93.03	92.00	88.27	88.27	93.03	91.50
Fierro total	97.76	99.80	99.75	98.95	99.78	97.76	99.80	99.21
Fluoruros	98.28	98.24	98.19	98.18	98.06	98.06	98.28	98.19
Manganeso total	99.98	99.98	99.98	100.00	100.00	99.98	100.00	99.99
Sodio total	97.25	96.66	98.84	96.40	98.08	96.40	98.84	97.45
Nitrógeno amoniacal	98.36	95.72	98.31	95.59	98.56	95.59	98.56	97.31
SDT	97.31	95.97	97.15	95.98	97.63	95.97	97.63	96.81
Sulfatos	94.19	98.57	84.25	91.69	95.92	84.25	98.57	92.92
DQO	100.00	100.00	100.00	100.00	-	100.00	100.00	100.00
COT	100.00	100.00	97.04	98.67	-	97.04	100.00	98.93

La tabla 5.11 muestra una de las principales problemáticas que se enfrentaron en el transcurso de la experimentación, la cual fue la variabilidad en las concentraciones en la

fuente de suministro a la potabilizadora La Caldera, provocando a su vez diferencias en el efluente tratado con el tren de tratamiento T2. Los parámetros que presentaron mayor dispersión en el caudal de entrada al tratamiento fueron: hierro, DQO y COT. El cálculo del coeficiente de variación, que es una relación entre la desviación y el tamaño de la media ($\frac{\sigma}{\bar{x}}$), permitió determinar la variabilidad que se tuvo a lo largo de la experimentación y tenerlo en cuenta antes de poder concluir al respecto.

Tabla 5.11 Valores promedio, coeficiente de variación y eficiencia global

Parámetro	Influyente		Efluente		Eficiencia Promedio
	Promedio	Cv	Promedio	Cv	
Cloruros	195.80	0.07	9.80	0.18	94.97
Dureza total	247.80	0.13	20.60	0.07	91.50
Hierro	1.58	1.33	0.01	1.77	99.21
Fluoruros	0.34	0.04	0.01	0.01	98.19
Manganeso total	0.45	0.05	0.00	0.00	99.99
Sodio total	211.03	0.13	5.38	0.43	97.45
Nitrógeno amoniacal	6.17	0.15	0.16	0.57	97.31
SDT	960.40	0.07	30.60	0.25	96.81
Sulfatos	30.75	0.06	2.12	0.71	92.92
DQO	21.25	0.25	0.00	-	100.00
COT	12.05	0.38	0.18	0.61	98.93

En general, se observa que el proceso de experimentación fue más complejo y extenso para esta fuente, desde la tabla inicial se muestran los parámetros de interés los cuales corresponden a grupos variados de contaminantes, como lo son metales, fisicoquímicos y el valor de color verdadero por arriba del límite permisible establecido por la NOM-127-SSA-1994 que podría indicar presencia de materia orgánica así como por la presencia de hierro y manganeso; lo cual finalmente se corroboró, con un valor promedio de 21.25 mg/l de DQO y 12.05 mg/l para COT así como valores promedio de 1.58 y 0.45 mg/l de hierro y manganeso, respectivamente.

El proceso de selección del tratamiento se enfocó principalmente en elevar la eficiencia de la etapa de filtración, para obtener un desempeño equitativo entre los procesos de tratamiento. La etapa de filtración que inicialmente consistía en filtración con grava y arena, y un proceso de intercambio iónico (zeolita) fue modificado al observar que la zeolita no presentaba las remociones esperadas. Las pruebas utilizando resina de intercambio iónico demostraron que los cartuchos de filtración podían mejorar su desempeño.

Esto, además de demostrar que se pueden mejorar las eficiencias de los pretratamientos realizando una adecuada caracterización de la fuente y adecuando los procesos de tratamiento, disminuye la dependencia casi total que existiría sobre la membrana de ósmosis inversa ya que en dado caso que llegara a fallar al menos existió una buena remoción de algunos parámetros en las etapas previas, como fue el caso de hierro, manganeso y nitrógeno amoniacal en el primer pretratamiento, los cuales influyen en el rechazo del agua por los usuarios.

A manera de resumen la tabla 5.12 presenta una comparación de las eficiencias promedio obtenidas para las dos fuentes que fueron objeto de estudio en esta investigación además de incluir los resultados del proyecto que la precede. En esta tabla sólo se muestran los parámetros que se repitieron en los tres experimentos. Aun cuando la concentración en el caudal de entrada a estos tratamientos presentó características de calidad muy variables, es importante destacar que en todos los casos el porcentaje de remoción es igual o mayor al 95% exceptuando hierro, sulfatos y nitratos; demostrando que el tratamiento con los procesos de la planta piloto, incluyendo la modificación que se hizo en la etapa de filtración para el sitio de La Caldera, es posible obtener agua con calidad de acuerdo a los requerimientos que establece la norma para agua potable en todos los casos reportados en esta investigación.

Tabla 5.12 Comparación parámetros en común

Parámetro	% Promedio eficiencias		
	La Caldera	Agua real Mezquital	Sintéticas Mezquital
Cloruros	94.97	99	95.97
Hierro	99.21	-	90.42
Fluoruros	98.19	98.79	96.29
Manganeso	99.99	-	99.51
Sodio total	97.45	96.87	98.05
SDT	96.81	99	97.45
Sulfatos	92.92	99.63	99.59
Nitratos	-	93.23	93.24
Arsénico	-	99	99.04

Al finalizar estas dos experiencias se pueden destacar dos puntos de control cruciales en la operación de la planta. El primero es el sistema de pretratamiento conformado por los tres filtros, el cual adquiere significancia debido a que, desde el primer proceso de tratamiento, con una adecuada caracterización de la fuente y selección de los medios es posible obtener remociones mayores al 50% en parámetros como dureza total, hierro, manganeso, sodio y nitrógeno amoniacal, que de otra forma tendrían que ser eliminados en la membrana de ósmosis inversa. Así pues, este

punto tiene mayor peso en la eficiencia global del sistema además de proporcionar protección a procesos más sensibles, como las membranas, aumentando su tiempo de vida.

Lo cual conduce al segundo punto de control, la membrana de ósmosis inversa; éste es el proceso más importante ya que prácticamente de ella depende que los contaminantes que no se removieron en etapas anteriores sean eliminados en este punto. El efluente de la ósmosis inversa debe cumplir con la norma oficial que regula la calidad de agua potable.

Un tema que no se puede dejar de mencionar es la disposición de los residuos generados cuando se utilizan este tipo de tratamientos, por ejemplo, los medios de filtración (arena, grava, zeolita), la resina de intercambio iónico, ya no es posible regenerarlos y llegan al punto de agotamiento. En el caso de esta investigación en particular el reemplazo de estos materiales se realizó al finalizar un determinado número de experimentos (5 por lo general); este trabajo no incluyó el monitoreo ni determinación de punto de agotamiento de estos medios por lo cual se puede plantear como recomendación para posteriores investigaciones.

Sin embargo, no fue un punto que se descuidara totalmente, además de no utilizar los medios por periodos muy largos, se realizaron análisis de concentraciones para saber qué contaminantes y en qué cantidad se iban acumulando en las diversas etapas; esto permitió determinar que la arena, grava, zeolita y carbón activado podían ser dispuestos como residuos sólidos en los contenedores de basura del laboratorio. En cuanto a la resina de intercambio iónico por lo general un proceso de regeneración restablece su capacidad de intercambio hasta en un 90% disminuyendo conforme a las veces que se repita este proceso, por lo cual se suele retornar al proveedor el cual debe de contar con un procedimiento establecido para este tipo de residuos.

En cuanto al rechazo de la membrana de ósmosis inversa Pérez-González (2012) menciona que las opciones de tratamiento están directamente relacionadas de acuerdo a la fuente de la que provienen y propone una clasificación: i) plantas de desalinización, ii) efluentes terciarios de plantas de tratamiento de agua residual y iii) provenientes de la industria minera; y para cada una de ellas corresponden tratamientos específicos. En general el manejo del rechazo es uno de los principales retos en la operación de la ósmosis inversa, teniendo prácticamente que dar un tratamiento avanzado a este efluente cuando se sabe que los contaminantes presentes son altamente perjudiciales. Por ejemplo Benner (2008) propone un tratamiento de ozonación para el concentrado generado de un proceso de ósmosis inversa que tiene como fuente un efluente secundario proveniente de una planta de tratamiento de agua residual al cual se le da tratamiento avanzado para posteriormente inyectarlo en el sistema de distribución de agua potable (reúso potable

directo); la ozonación en este caso funciona perfectamente pues dada la caracterización de este residuo se encontró que estaba conformada principalmente por contaminantes emergentes y recalcitrantes; TaoZhou (2011) combinó diferentes procesos avanzados de oxidación química para un caso similar.

Dialynas (2008) por su parte encontró que la adsorción con carbón activado tenía eficiencias mayores al 90% para un efluente de un biorreactor tratado con ósmosis inversa, dado que la mayor problemática era el alto contenido de carbón orgánico disuelto y una vez resuelta esta cuestión poder verter a cuerpos de agua naturales.

Otro punto importante a considerar en futuras experimentaciones, y que en un inicio se planteó para este proyecto sería la operación de la planta piloto como un sistema de barreras múltiples, que para este caso en específico consistiría en recircular el agua sólo en algunas etapas de tratamiento o por el contrario que no circule por todas; además este prototipo está diseñado para facilitar esto, ya que cuenta con válvulas para poder conectar y desconectar los conductos de agua entre cada etapa del tratamiento.

Hoy en día las fuentes convencionales son insuficientes para abastecer a las grandes ciudades y/o regiones semiáridas, y esta problemática irá aumentando. Las fuentes de abastecimiento no convencionales son una posible solución, pero a su vez es necesario realizar estudios a profundidad y generar una base de resultados confiables para tener la certeza de ofrecer agua de calidad.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se potabilizó agua de dos fuentes no convencionales utilizando procesos avanzados a escala piloto. De acuerdo a los resultados obtenidos se concluye que:

- Es factible el uso para consumo humano del agua tratada de ambas fuentes con los procesos avanzados evaluados.
- Lo que determina el orden y número de procesos de tratamiento es la calidad del agua antes de entrar al tratamiento avanzado y que en gran medida está correlacionada con la fuente de procedencia de la misma.
- Por lo tanto, una buena caracterización de la fuente es esencial para obtener óptimos resultados.
- Para la fuente 1 (Valle del Mezquital) el agua tratada cumple con la norma NOM-127-SSA1-1994, modificación 2000 utilizando el tratamiento 1 (T1) que consistió en los tres filtros (grava y arena, zeolita y carbón activado), los módulos de ultrafiltración y ósmosis inversa.
- Por ello, el reúso potable indirecto del agua subterránea del Valle del Mezquital es factible con los procesos avanzados evaluados a través del tratamiento T1.
- La incorporación de resina de intercambio iónico como medio filtrante aumentó la eficiencia de tratamiento para la fuente 2 (caudal de planta potabilizadora “La Caldera”).
- El tren de tratamiento 2 (T2) integrado por tres cartuchos de filtración (arena y grava, resina de intercambio iónico y carbón activado) además de los tratamientos subsecuentes de ultrafiltración y ósmosis inversa, es el más eficiente para obtener agua potable que cumple con la norma NOM-127-SSA1-1994, modificación 2000 para la fuente 2 (caudal de planta potabilizadora “La Caldera”).
- El pretratamiento con cartuchos de filtración específicos para cada fuente, así como la membrana de ósmosis inversa tienen las mayores eficiencias de remoción, por lo que son los puntos de control en la operación de la planta para garantizar la obtención de agua con calidad potable.
- El agua tratada de ambas fuentes con los procesos avanzados evaluados, requiere de un tratamiento final (carbonatación y desinfección) previo a la distribución para el consumo humano.

Recomendaciones:

Realizar más pruebas para determinar la saturación de los medios y así obtener el máximo rendimiento de cada uno de ellos, además de saber la cantidad de contaminantes que se retienen, medidos experimentalmente y no por balances de materia.

Evaluar opciones para el tratamiento del rechazo de la membrana de ósmosis inversa considerando que la calidad del agua de la fuente de abastecimiento es no convencional.

Operar la planta piloto como un sistema de barreras múltiples, con base en las eficiencias de los procesos obtenidos, para optimizar el rendimiento de los medios y la vida útil de las membranas.

Bibliografía

1. A Pérez-González, AM Urtiaga, R Ibáñez, I Ortiz (2012). State of the art and review on the treatment technologies of water reverse osmosis concentrates. *Water research-Elsevier* 2012; 46:267–283.
2. Almanza Garza, V. (2000). “Reúso agrícola de las aguas residuales de Cd. Juárez (Chih., México). En el Valle de Juárez y su impacto en la salud pública”, *Revista Salud Pública y Nutrición* 1(3): 1-11.
3. Angelakis, A. and Spyridakis, S. (1996). The status of wastewater resources in Minoan times: a preliminary study. *Diachronic Climatic Impacts on Water Resources in Mediterranean Region*.
4. Benner, J.; Salhi, E.; Ternes, T.; von Gunten, U., (2008). Ozonation of reverse osmosis concentrate: Kinetics and efficiency of beta blocker oxidation. *Water Research* 42(12), 3003–3012
5. California Water Code (1989). The Porter-Cologn Water Quality Control Act (1988 Amendments), Chapter 7, Article 2, Section 13512. California, Dept. of Water Resour., Sacramento, CA.
6. Carrera-Hernández, J.J., Gaskin, S.J., (2007). The Basin of Mexico aquifer system: Regional groundwater level dynamics and database development: *Hydrogeology Journal*, 15(8), 1577-1590.
7. Carter, D.L. (2009). Status of the Regenerative ECLSS Water Recovery System, NASA Marshall Space Flight Center, U.S. Department of Interior, 10.4271/2009-01-2352
8. Chávez, A., Maya, C., Gibson, R., Jiménez, B. The removal of microorganisms and organic micropollutants from wastewater during infiltration to aquifers after irrigation of farmland in the Tula Valley, Mexico. *Environmental Pollution*. 2011; 159(5) 1354-1362.
9. CNA & BGS (1995). Impact of Wastewater Reuse on Groundwater in the Mezquital Valley, Hidalgo State, Mexico. Overseas Development Administration. México.
10. Crook, J. (1985). Water reuse in California. *Water works association*, 77(7), 61.
11. Dialynas, Emmanuel & Mantzavinos, Dionissios & Diamadopoulos, Evan. (2008). Advanced treatment of the reverse osmosis concentrate produced during reclamation of municipal wastewater. *Water research*. 42. 4603-8.
12. Dishman, M., Sherrard, J. and Rebhun, M. (1989). Gaining support for direct potable water reuse. *Water Science Technology*, 115, 154-161.
13. du Pisani, P.L (2005). “Direct Reclamation of Potable Water at Windhoek’s Goreangab Reclamation Plant”, pp. 193-202, in S.J Khan, M.H Muston, and A.I Schafer (Eds.) *Integrated Concepts in Water Recycling 2005*, University of Wollongong, Wollongong, Australia.
14. Durazo, J. and R. N. Farvolden (1989), “The groundwater regime of the Valley of Mexico from historic evidence and field observations”, *Journal of Hydrology*, vol. 112, pp. 171-190.
15. Estadísticas del agua en México (2015). Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).
16. European Communities Commission Directive (1991). Council directive regarding the treatment of urban wastewater (91/271/EEC). *Official Journal of the European Communities*, No. L135 of the 91.5.30, 40-50.
17. Fair, G.M and Geyer, J.C (1954). *Water Supply and wastewater disposal*. John Wiley and sons, New York
18. Federal-Provincial-Territorial Committee on Drinking Water and the CCME Water Quality Task Group (2004). *From Source to tap: Guidance on the Multi-Barrier Approach to Safe Drinking Water*, 15-16.
19. George Tchobanoglous, Harold Leverenz, Margaret H. Nellor, James Crook. (2011). *Direct potable reuse, a path forward*. Watereuse.
20. Harold, L. Leverenz, George Tchobanoglous y Takashi Asano. (2011). *Direct potable reuse: a future imperative*. *Journal of water reuse and desalination*, 01.1, 2.

21. Hernández, G., Flores, L., (1994). "Riesgo de acumulación de Cd, Pb, Cr y Co en tres series de suelos del DR03, estado de Hidalgo, México", *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. Vol. 11, Núm. 1.
22. Huízar, A. R. (1989), *Contributions à l'étude géologique et hydrogéologique de la plaine de Chalco-Amecameca et de son bassin versant (Mexique)*, Diplôme de docteur de l'université de Besançon, France
23. Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación (2014), recuperado del portal de CONAGUA, http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/Inventario_Nacional_Plantas1.pdf
24. JG Menge and JL Slabbert (1999). Toxicity testing at Goreangab Reclamation Plant – past, present and future. *Proceedings at the 9th International Symposium on Toxicity Assessment (ISTA)*, held in Pretoria, RSA.
25. Jiménez, B., Chávez, A. Quality assessment of an aquifer recharged with wastewater for its potential use as drinking source: "El Mezquital Valley" case. *Water Science and Technology*. 2004;50(2) 269-276.
26. Jiménez, B., N. López y C. Sotomayor (1997). Estudio de la calidad y suministro del agua para consumo doméstico en el Valle del Mezquital, elaborado para la Comisión Nacional del Agua por el Instituto de Ingeniería, UNAM, Proyecto 5322,269 p.
27. Lahnsteiner, J., and G. Lempert (2005). "Water Management in Windhoek/Namibia." In: *Proceedings of the IWA Conference, Wastewater Reclamation and Reuse for Sustainability*, 2005, Jeju, Korea.
28. Lauer, W.C and S.E. Rogers (1998). "The Demonstration of Direct Potable Reuse: Denver's Landmark Project." pp. 1269-1333, in T. Asano (ed.) *Wastewater Reclamation and Reuse*, Water Quality Management Library, Vol. 10, Technomic Publishing Company, Inc., Lancaster, PA.
29. Livingston, E. (2008). "Village of Clouderoft, Nm PUREwater Project," Slide presentation given at the WaterSmart Innovations Conference and Exposition October 8-10, 2008, Las Vegas, NV.
30. Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento (2014). Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).
31. Maples, M. (1990). "Antecedentes físicos, históricos y socioeconómicos del distrito de desarrollo rural 063 Estado de Hidalgo". Primer Simposio Nacional. Degradación del Suelo. Memorias. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). México.
32. Méndez, G.T. (1982). Estudio sobre contaminación de suelos agrícolas del Valle del Mezquital, Hidalgo, por A.B.S., boro y metales pesados, por el uso de aguas negras de la Ciudad de México. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), México, México, 43-45.
33. Morales-Casique, E., Escolero, O., Arce, J.L., (2014). Resultados del pozo San Lorenzo Tezonco y sus implicaciones en el entendimiento de la hidrogeología regional de la cuenca de México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 31, 64-75.
34. Orange County Water District. (2016). Purification Process. 8 Noviembre 2016, de Orange County Water District Sitio web: <http://www.ocwd.com/gwrs/the-process/>
35. Ortega-Guerrero, M. A., D. L. Rudolph and J. A. Cherry (1999), "Analysis of long-term land subsidence near Mexico City. Field investigations and predictive modeling", *Water Resources Research* 25(11), pp. 3327-3341
36. Prado, B., C. Siebe, W. A. Bischoff, L. Hernández Martínez, L. Mora (2015). El suelo: guardián de la calidad del agua subterránea. *CONABIO. Biodiversitas*, 122:6-9
37. Sloan, D.W., Wingert, C., and Cadena, I. (2010). "Potable Reuse in the Permian Basin." Presented at the 25th WaterReuse Symposium, Washington, D.C.

38. T Zhou, TT Lim, SS Chin, AG Fane (2011). Treatment of organics in reverse osmosis concentrate from a municipal wastewater reclamation plant: Feasibility test of advanced oxidation processes with/without pretreatment Elsevier - Chemical Engineering Journal 166. 932-939.
39. Takashi, A. and Levine, A. (1996). Wastewater reclamation, recycling and reuse: past, present and future. Water Science Technology, 33, 1-14.
40. U.S Patent (1979). U.S. Patent number 4,145,279, issued on Mar. 20, 1979, US Patent Office, Washington DC
41. U.S. E.P.A., U.S. Agency of International Development (1992). Manual of Guidelines for water reuse, EPA/625/R-92/004
42. William C. Lauer (2016). The Demonstration of Direct Potable Water Reuse: The Denver Project Technical Report. QualQuests, LLC.

Anexo A: Bibliografía metales

1. A.A.M. Daifullah, B.S. Girgis Removal of some substituted phenols by activated carbon obtained from agricultural waste *Water Res*, 32 (1998), pp. 1169–1177
2. Arraigada, R., R. Garcia y R. Cid, Retención de Cromo y Mercurio con Zeolitas Naturales y Sintéticas, Informe Interno de la Facultad de Ciencias Químicas, Universidad de Concepción, Chile (2001).
3. B. Rahmanian, M. Pakizeh, A. Maskooki Micellar-enhanced ultrafiltration of zinc in synthetic wastewater using spiral-wound membrane *J Hazard Mater*, 184 (2010), pp. 261–267
4. Bilstad, T. and Madland, M.V., Leachate minimization by reverse Osmosis, *Water Sci. Technol.*, 25, 117, (1992).
5. Cengeloglu, Y.; Arslan, G.; Tor, A.; Kocak, I.; Dursun, N. *Separ Purif Technol* 2008, 64, 141–146.
6. Chingombe, P.; Saha, B.; Wakerman, R.J. Surface modification and characterisation of a coal-based activated carbon *Carbon* 43, 3132–3143 (2005).
7. Fluoride in drinking water and its removal *J. Hazard. Mater.*, 137 (2006), pp. 456–463
8. G. Arthanareeswaran, P. Thanikaivelan, N. Jaya, D. Mohan, M. Raajenthiren Removal of chromium from aqueous solution using cellulose acetate and sulfonated poly (ether ether ketone) blend ultrafiltration membranes *J. of Hazard. Mater.*, B139 (2007), pp. 44–49
9. G. Morel, et al. Surfactant modified ultrafiltration of nitrate ions removal *J. Membr. Sci.*, 134 (1997), pp. 47–57
10. Ghaffour, N., Missimer, T.M., Amy, G.L., 2013. Technical review and evaluation of the economics of water desalination: current and future challenges for better water supply sustainability. *Desalination* 309, 197e207.
11. Gholami, M. M., Mokhtari, M. A., Aameri, A. & Alizadeh Fard, M. R. (2006). Application of reverse osmosis technology for arsenic removal from drinking water. *Desalination*, 200 (1-3): 725-727.
12. Gual García J. (1994). Intoxicación por plomo. *LAB* 2000 53:5-17.
13. H Ozaki, H Li Rejection of organic compounds by ultra-low pressure reverse osmosis membrane *Water Res*, 36 (1) (2002), pp. 123–130
14. H.A. Qdais, H. Moussa Removal of heavy metals from wastewater by membrane processes: a comparative study *Desalination*, 164 (2004), pp. 105–110
15. Hintermeyer, b. H.; Lacour, n. A.; Perez Padilla, A. and Tavani, e. L. Separation of the chromium(III) present in a tanning wastewater by means of precipitation, reverse osmosis and adsorption. *Lat. Am. appl. res.* [online]. 2008, vol.38, n.1, pp. 63-71. ISSN 0327-0793.
16. Holl, w. y Litter m., (2010). “Ocurrencia química del arsénico en aguas. Sumario de tecnologías de remoción de arsénico de aguas. *IBEROARSEN CYTED* (Ed.). Distribución del arsénico en las regiones Ibérica e Iberoamericana.
17. Iqbal et al., 2007 *J. Iqbal, H.J. Kim, J.S. Yang, K. Baek, J.W. Yang* Removal of arsenic from groundwater by micellar-enhanced ultrafiltration (MEUF) *Chemosphere*, 66 (2007), pp. 970–976
18. J. Bohdziewicz, M. Bodzek, E. Wasik The application of reverse osmosis and nanofiltration to the removal of nitrates from groundwater *Desalination*, 121 (1999), pp. 139–147
19. J. Schick, P. Caullet, J. Paillaud, J. Patarin, C. Mangold-Callarec Batch-wise nitrate removal from water on a surfactant-modified zeolite *Microporous Mesoporous Mater.*, 132 (2010), pp. 395–400
20. J. Shen, A. Schäfer, Removal of fluoride and uranium by nanofiltration and reverse osmosis: a review *Chemosphere*, 117 (2014), pp. 679–691

21. K. Baek, J.W. Yang Removal of ferricyanide using micellar enhanced ultrafiltration (MEUF) Dev Chem Eng Miner Process, 13 (2005), pp. 137–146
22. K. Choo, S. Han, S. Choi, J. Jung, D. Chang, J. Ahn, M. Benjamin Use of chelating polymers to enhanced manganese removal in ultrafiltration for drinking water treatment J. Ind. Eng. Chem., 13–2 (2007), p. 163
23. K. Kadirvelu, C. Faur-Brasquet, P. Le Cloirec Langmuir, 16 (2000), pp. 8404–8409
24. K. Xu, G.M. Zeng, J.H. Huang, J.Y. Wu, Y.Y. Fang, G. Huang, J. Li, B. Xi, H. Liu Removal of Cd²⁺ from synthetic wastewater using micellar-enhanced ultrafiltration with hollow fiber membrane Colloid Surf. A-Physicochem. Eng. Asp., 294 (2007), pp. 140–146
25. Kabay, N., Gueler, E., Bryjak, M., 2010. Boron in seawater and methods for its separation. A review. Desalination 261, 212e217.
26. Kuleyin Removal of phenol and 4-chlorophenol by surfactant-modified natural zeolite Journal of Hazardous Materials, 144 (2007), pp. 307–315
27. Lester, N. J. (1987). “Heavy Metals in Wastewater and Sludge Treatment Processes”. Vol. 1 Sources, Analysis and Legislation. CRC. Press, Inc. pp. 31-59.
28. Leyva-Ramos R, Sanchez-Castillo MA, Hernandez-Sanchez MV and Guerrero Coronado RM, Remoción de metales pesados de solución acuosa por medio de Clinoptilolitas naturales. Rev Int Contam Ambient 17: 129–136 (2001).
29. Liliana Giraldo, Juan Carlos Moreno-Piraján Adsorción simple y competitiva de níquel y cadmio sobre carbón activado granular: efecto del pH. Paola Rodríguez-Estupiñán Universidad Nacional de Colombia Facultad de Ciencias, Departamento de Química, Ciudad Universitaria, Bogotá-Colombia (2011).
30. Luzi S., Berg M., Pham T.K.T. & Schertenleib, R.: *Household Sand Filters for Arsenic Removal- Technical Report*. Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology (EAWAG). Duebendorf, Suiza, 2004. Disponible en: www.arsenic.eawag.ch/publications.
31. M. Khalid, G. Joly, A. Renaud, P. Magnoux Removal of phenol from water by adsorption using zeolites Ind. Eng. Chem. Res., 43 (2004), pp. 5275–5280
32. M.E. Goher, A.M. Hassan, I.A. Abdel-Moniem, A.H. Fahmy, M.H. Abdo, S.M. El-sayed Removal of aluminum, iron and manganese ions from industrial wastes using granular activated carbon and Amberlite IR-120H Egypt. J. Aquat. Res., 41 (2) (2015), pp. 155–164
33. Manal El-Sadaawy, Ola Abdelwahab, Adsorptive removal of nickel from aqueous solutions by activated carbons from doum seed (Hyphaenethebaica) coat, Alexandria Engg. J., 2014, 53, 399–408.
34. Mandal, B. & Suzuki, K.: Arsenic round the world: a review. *Talanta* 58 (2002), págs. 201-235.
35. Mažeikiene, A., Valentukevičiene, M., Rimeika, M., Matuzevičius, A.B. and Daukyns, R. 2008. Removal of nitrates and ammonium ions from water using natural sorbent zeolite (clinoptilolite), Journal of Environmental Engineering and Landscape Management, 16(1): 38–44.
36. Meenakshi, R.C. Maheshwari
37. Mochida, Y. Koraia, M. Shirahama, S. Kawano, T. Hada, Y. Seo, et al. Removal of SO and NO over activated carbon fibers Carbon, 38 (2000), pp. 227–239
38. Mohan, D. & Pittman, C.U. jr.: Arsenic removal from water/wastewater – a critical review, *J.Hazard. Mat.* 142 (2007), págs. 1-53.
39. Mohsen-Nia, M.; Montazeri, P.; Modarress, H. Removal of Cu²⁺ and Ni²⁺ from wastewater with a chelating agent and reverse osmosis processes Desalination 2007, 217, 276– 281
40. Montiel Cota et al: Eliminación de Flúor en Agua Potable Revista de Ciencias Biológicas y de la Salud XV (2): 10-14 (2013).

41. N. Adhoum, L. Monser Removal of cyanide from aqueous solution using impregnated activated carbon Chem. Eng. Process., 41 (2002), pp. 17–21.
42. N. Öztürk, D. Kavak, T.E. Köse Boron removal from aqueous solution by reverse osmosis Desalination, 223 (1–3) (2008), pp. 1–9.
43. N. Öztürk, T.E. Bekta Nitrate removal from aqueous solution by adsorption onto various materials J. Hazard. Mater., B112 (2004), pp. 155–162.
44. Newcombe, R.L. & Möller, G.: *Arsenic removal from drinking water: A review*, Disponible en: <http://www.blueh2o.net/docs/asreview%20080305.pdf>.
45. P. Yenphan, A. Chanachai, R. Jiratananon Experimental study on micellar-enhanced ultrafiltration (MEUF) of aqueous solution and wastewater containing lead ion with mixed surfactants Desalination, 253 (2010), pp. 30–37.
46. Padilla, B., Leiva, D. y Flores, P. Comparación entre un proceso de filtración simple y múltiple para tratar agua subterránea con alto índice de hierro (Fe+2) Centro Poblado Alianza, San Martín, (2015).
47. Parks, J.L., Edwards, M., 2005. Boron in the environment. Crit. Rev. Environ. Sci. Technol. 35 (2), 81e114.
48. Pirnie, M.: *Technologies and costs for removal of arsenic from drinking water*. EPA 815-R-00-028, 2000.
49. Qin et al., 2002 J.-J. Qin, M.-N. Wai, M.H. Oo, F.S. Wong A feasibility study on the treatment and recycling of a wastewater from metal plating Journal of Membrane Science, 208 (1–2) (2002), pp. 213–221
50. R. Sublet, M.O. Simonnot, A. Boireau, M. Sardin Selection of an adsorbent for lead removal from drinking water by a point-of-use treatment device Wat. Res., 37 (2003), pp. 4904–4912
51. R.R. Dash, C. Balomajumder, A. Kumar Removal of cyanide from water and wastewater using granular activated carbon Chem. Eng. J., 146 (2009), pp. 408–413
52. R.Y. Ning Arsenic removal by reverse osmosis Desalination, 143 (2002), pp. 237–241
53. Rautenbach, R.; Vossenkau, K.; Linn, T.; Katz, T. Waste water treatment by membrane processes - New development in ultrafiltration, nanofiltration and reverse osmosis Desalination 1996, 108, 247–253
54. Recovery of copper from process waters by nanofiltration and reverse osmosis Desalination Volume 240 (15 May 2009) 132-142 Cséfalvay, Viktor Pauer, Peter Mizsey
55. Removal of Ni(II) and Zn(II) from an aqueous solution by reverse osmosis Desalination Volume 174, (10 April 2005) Pages 161-169 Ubeyde Ipek
56. Revelli G.R., Seuchuc M.T., Tonutti F.G., Costa G.V. Método económico de remoción de arsénico en aguas para comunidades rurales. Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica. 2014;7(3):228-242.
57. Revista colombiana de química, volumen 27, no. 1 de 1998 remoción de cobre y níquel por intercambio catiónico con una zeolita natural Arnoldy Estupiñán, Diego Sarmiento, Ana María Belalcázar de Galvis* 1998.
58. Revista Ingenierías Universidad de Medellín Evaluación de la eficiencia de una batería de filtros empacados en zeolita en la remoción de metales pesados presentes en un licor mixto bajo condiciones de laboratorio Diana Rocío Acevedo Cifuentes Sandra Milena Builes Felizzola Carlos Andrés Ordóñez Ante Idalia Jacqueline López Sánchez 2011.
59. Rodríguez-Reinoso. F. El Carbón Activado Como Adsorbente Universal, In Handbook of Solidos porosos preparación, caracterización y aplicaciones. Editor Académico Moreno- Pirajan J.C., Bogota. (2007).

60. S. A. Mousavi Rad, S. A. Mirbagheri, and T. Mohammadi Using Reverse Osmosis Membrane for Chromium Removal from Aqueous Solution. World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering Vol:3, No:9, 2009.
61. S. Mozia, M. Tomaszewska, A.W. Morawski Studies on the effect of humic acids and phenol on adsorption-ultrafiltration process performance Water Res., 39 (2–3) (2005), pp. 501–509.
62. Sancha A.M.: Removing Arsenic from Drinking Water: A Brief Review of some Lessons Learned and Gaps arisen in Chilean Water Utilities. En: W.R. Chappell, C.O. Abernathy, R.L. Calderon, D.J. Thomas (eds): *Arsenic Exposure and Health Effects V*, Cáp. 36, Elsevier, Amsterdam, 2003, págs. 471-481.
63. Sandoval, L.: *Estabilización y disposición de residuos que contienen arsénico*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México, 2000.
64. Seco, A., Gabaldon, C., Marzal, P., Aucejo, A.: Effect of pH, cation concentration and sorbent concentration on cadmium and copper removal by a granular activated carbon. J. Chem. Technol. Biotechnol. 74, 911–918 (1999).
65. Shen, J., & Schaefer, A. (2014). Removal of fluoride and uranium by nanofiltration and reverse osmosis: a review. *Chemosphere*, 117, 679-691. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2014.09.090.
66. Smedley, P. & Kinniburgh, D.: A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Appl. Geochem.* 17 (2002), págs. 517-568.
67. Spahis, N.; Addoun, A.; Mahmoudi, H.; Ghaffour, N. Purification of water by activated carbon prepared from olive stones. *Desalination* 222, 519–527 (2008)
68. T. Mustafa, U. Mart, B. Yuksel, M.S. Celik Lead removal in fixed-bed columns by zeolite and sepiolite *Chemosphere*, 60 (2005), pp. 1487–1492
69. Tagliabue, M., Reverbeti, A.P., Bagatin, R., 2014. Boron removal from water: needs, challenges and perspectives. *Journal of Cleaner Production* 77, 56-64.
70. Thelma B. Pavón Silva, Eduardo Campos, María Teresa Olgún, Remoción de níquel, cadmio y zinc del agua, utilizando clinoptilolita heulandita, *Ciencia Ergo Sum*, vol. 7, núm. 3, noviembre, 2000, Universidad Autónoma del Estado de México, México.
71. V. Petkova "Uso de zeolitas naturales en la remoción de Mn". *Ingeniería Hidráulica en México*. Vol. 12. 1997. pp. 41-48.
72. V. Petkova, M.L. Rivera, M. Piña, M. Avilés, S. Pérez, Evaluación de diversos minerales para la remoción de arsénico de aguapara consumo humano, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. 73 (1997) 19-43-91
73. V.D. Karate, K.V. Marathe Simultaneous removal of nickel and cobalt from aqueous stream by cross flow micellar enhanced ultrafiltration *J. Hazard. Mater.*, 157 (2008), pp. 464–471
74. Vaca Mier, Mabel; Magdaleno Chapa, Laura; Sosa Carrera, Mónica; Monroy Mendieta, Magdalena; Jiménez Cisneros, Blanca. In. AIDIS. Consolidación para el desarrollo. México, D.F, AIDIS, 1996. p.1-8 [t.1], Ilus., tab.
75. Van der Bruggen, B., Vandercastele, C., 2002. Distillation vs. membrane filtration: overview of process evolution in seawater desalination. *Desalination* 143, 207e218.
76. Wolska, J., Brijak, M., 2013. Methods for boron removal from aqueous solutions. A review. *Desalination* 310, 18e24.
77. XV Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales (2006) Remoción de hierro y manganeso en la planta potabilizadora del ramal peñón- texcoco, estado de México Patricia Flores Ordeñana, Juana Vázquez Ocampo

78. Y. Bao, X. Yan, W. Du, X. Xie, Z. Pan, J. Zhou, et al. Application of amine-functionalized MCM-41 modified ultrafiltration membrane to remove chromium (VI) and copper (II) Chem. Eng. J., 281 (2015), pp. 460–467

Anexo B: Hoja técnica resina de intercambio iónico



Safety Data Sheet

Product Names: CGS, CGS-BL, CG8, CG8-BL, CG8-C, CG8-F, CG8-UPS, CG8-HP, CG8-NS, CG10, CG10-BL, CG10-UPS, CG10-HP, SACMP, SACMP-UPS

(Cation Exchange Resin in the Sodium Form)

Effective date 31 March 2015

Section 1: Identification

1a	Product Names	ResinTech CGS, CGS-BL, CG8, CG8-BL, CG8-C, CG8-F, CG8-UPS, CG8-HP, CG8-NS, CG10, CG10-BL, CG10-UPS, CG10-HP, SACMP, SACMP-UPS
1b	Common Name	Cation exchange resin in the sodium form.
1c	Intended use	All general purpose cation exchange for general use including water softening and demineralization.
1d	Manufacturer Address	ResinTech, Inc. 160 Cooper Road, West Berlin, NJ 08091 USA
	Phone	856-768-9600
	Email	ixresin@resintech.com

Section 2: Hazard Identification

2a OSHA Hazard classification Not hazardous or dangerous

Product Hazard Rating	Scale
Health = 0	0 = Negligible
Fire = 1	1 = Slight
Reactivity = 0	2 = Moderate
Special – N/A	3 = High
	4 = Extreme

2b	Product description	Amber, tan or black colored solid beads with little or no odor.
2c	Precautions for use	Safety glasses and gloves recommended. Slipping hazard if spilled.
2c	Potential health effects	Will cause eye irritation. Ingestion is not likely to pose a health risk.
2d	Environmental effects	Little or none.

Section 2A: Hazard classification UN OSHA globally harmonized system



Warning (contains ion exchange resin)

H320: Causes eye irritation (Category 2B)

Precautionary Statements

P264: Wash hands thoroughly after handling.

P280: Wear protective gloves/protective clothing/eye protection/face protection

P305+351+338: IF IN EYES: Rinse cautiously with water for several minutes. Remove contact lenses if present and easy to do – continue rinsing.

P333+313: If skin irritation or a rash occurs: Get medical advice/attention.

P337+313: If eye irritation persists get medical advice/attention.

P403+233: Store in a well-ventilated place. Keep container tightly closed.

P411: Store at temperatures not exceeding 50 °C/ 122 °F.

Please refer to the safety data sheet for additional information regarding this product

ResinTech, Inc.
160 Cooper Road
West Berlin, NJ 08091-9234
856 768-9600
lxresin@resintech.com

Section 3: Composition/ Information on Ingredients

3a	Chemical name	Polystyrene sulfonate in the sodium form
3b	Ingredients	
	Polystyrene sulfonate in the sodium form	CAS# 69011-22-9 (40 - 60%)
	Water	CAS# 7732-18-5 (40 – 60%)

Section 4: First Aid Measures

4a	Inhalation	No adverse effects expected- normal use of product does not produce odors or vapors.
4b	Skin	Wash with soap and water- seek medical attention if a rash develops.
4c	Eye contact	Wash immediately with water- seek attention if discomfort continues.
4d	Ingestion	No adverse effects expected for small amounts, larger amounts can cause stomach irritation. Seek medical attention if discomfort occurs.

Section 5: Fire Fighting Measures

5a	Flammability	NFPA Fire rating = 1
5b	Extinguishing media	Water, CO2, foam, dry powder
5c	Fire fighting Procedures	Follow general fire fighting procedures indicated in the work place.
5d	Protective Equipment	MSHA/NIOSH approved self-contained breathing gear, full protective clothing.
5e	Combustion Products	Carbon oxides and other toxic gasses and vapors.
5f	Unusual Hazards	Product is not combustible until moisture is removed. Resin begins to burn at approximately 230° C. Auto ignition can occur above 500° C.

Section 6: Accidental Release Measures

- | | | |
|----|---------------------------|---|
| 6a | Personal Precautions | Keep people away, spilled resin can be a slipping hazard, wear gloves and safety glasses to minimize skin or eye contact. |
| 6b | Incompatible Chemicals | Strong oxidants can create risk of combustion products similar to burning. |
| 6c | Environmental Precautions | Keep out of public sewers and waterways. |
| 6d | Containment Materials | Use plastic, paper, or metal containers. |
| 6e | Methods of Clean-up | Sweep up material and transfer to containers. |

Section 7: Handling and Storage

- | | | |
|----|---------------------|--|
| 7a | Handling | Avoid prolonged skin contact. Avoid contact with salts or with salty water to prevent premature exhaustion of the resin. Keep resin moist and avoid allowing resin to completely dry. |
| 7b | Storage | Store in a cool dry place (0° to 45° C) in the original shipping container. This product is thermally sensitive and will have reduced shelf life if subjected to extended periods of time at temperatures exceeding 50° C. Although freezing does not usually damage ion exchange resins, avoid repeated freeze thaw cycles. |
| 7c | TSCA considerations | Ion exchange resins should be listed on the TSCA Inventory in compliance with State and Federal Regulations. |

Section 8: Exposure Controls/Personal Protection

- | | | |
|----|------------------------------|-----------------------------------|
| 8a | OSHA exposure limits | None noted. |
| 8b | Engineering Controls | Provide adequate ventilation. |
| 8c | Personal Protection Measures | |
| | Eye Protection | Safety glasses or goggles. |
| | Respiratory Protection | Not required for normal use. |
| | Protective Gloves | Recommended for extended contact. |

Section 9: Physical and Chemical Properties

Appearance	Amber, tan, or black beads.
Flammability or explosive limits	Flammable above 500° C
Odor	None
Physical State	Solid
Vapor pressure	Not available
Odor threshold	Not available
Vapor density	Not available
pH	Near neutral (6 to 8 typical)
Relative density	Approx 800 grams/Liter
Melting point/freezing point	Does not melt, freezes at approx. 0 C
Solubility	Insoluble in water and most solvents
Boiling point	Does not boil
Flash point	Approx 500° C
Evaporation rate	Does not evaporate
Partition Coefficient (n-octanol/water)	Not applicable
Auto-ignition temperature	Approx 500° C
Decomposition temperature	Above 230° C
Viscosity	Not applicable

Section 10: Stability and Reactivity

10a Stability	Stable under normal conditions.
10b Conditions to Avoid	Heat, exposure to strong oxidants.
10c Hazardous by-products	Organic sulfonates, charred polystyrene, aromatic acids and hydrocarbons, organic amines, nitrogen oxides, carbon oxides, chlorinated hydrocarbons.
10d Incompatible materials	Strong oxidizing agents (such as HNO ₃)
10e Hazardous Polymerization	Does not occur

Section 11: Toxicological Information

11a	Likely Routes of Exposure	Oral, skin or eye contact.
11b	Effects of exposure	
	Delayed	None known.
	Immediate (acute)	None known.
	Chronic	None known.
11c	Toxicity Measures	
	Skin Adsorption	Unlikely.
	Ingestion	Oral toxicity believed to be low but no LD50 has been established.
	Inhalation	Unknown, vapors are very unlikely due to physical properties (insoluble solid).
11d	Toxicity Symptoms	
	Skin Adsorption	Mild rash.
	Ingestion	Indigestion or general malaise.
	Inhalation	Unknown.
11e	Carcinogenicity	None known

Section 12: Ecological information

12a	Eco toxicity	Not harmful to plant or animal life.
12b	Mobility	Insoluble.
12c	Biodegradability	Not biodegradable.
12d	Bioaccumulation	Insignificant.
12e	Other adverse effects	Not Harmful to the environment.

Section 13: Disposal Considerations

13a	General considerations	Material is non-hazardous.
13b	Disposal Containers	Most plastic and paper containers are suitable.
13c	Disposal methods	No specific method necessary
13d	Sewage Disposal	Not recommended
13e	Precautions for incineration	May release toxic vapors when burned
13f	Precautions for landfills	Resins used to remove hazardous materials may then become hazardous mixtures.

Section 14: Transportation Information

14a	Transportation Class	Not classified as a dangerous good for transport by land, sea, or air.
14b	TDG	Not regulated.
14c	IATA	Not regulated.
14d	DOT (49 CFR 172.101)	Not Regulated.

Section 15: Regulatory Information

15a	CERCLA	Not regulated
15b	SARA Title III	Not regulated
15c	Clean Air act	Not regulated
15d	Clean Water Act	Not regulated
15e	TSCA	Not regulated
15f	Canadian Regulations WHMIS TDG	Not a controlled product Not regulated
15g	Mexican Regulations	Not Dangerous

Section 16: Other Information

The information provided in this safety data sheet is presented in good faith and believed to be accurate as of the effective date shown above. However, no warranty or guarantee of accuracy, express or implied is given. Regulatory requirements are subject to change and may differ from one location to another. It is the buyer's responsibility to ensure that their activities comply with federal, state, and local laws.

16a Date of Revision 31 March 2015