



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

EL REÚSO POTABLE INDIRECTO COMO ALTERNATIVA
PARA EL ABASTECIMIENTO DE LA ZONA METROPOLITANA
DEL VALLE DE MÉXICO.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:

INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A:

ESLÍ HIREPAN HERNÁNDEZ RIVERA

DIRECTOR DE TESIS:

DR. FERNANDO J. GONZÁLEZ VILLARREAL



México, D.F.

2012



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Dedicatoria

Ahora que he llegado a esta etapa de mi vida no puedo hacer menos que dedicar mis logros a esos seres humanos maravillosos que han sido maestros de la vida, mis abuelos. Lino Rivera, me mostraste que el amor existe, que cualquiera puede lograr lo que se proponga haciéndolo y no andar con “las manos en las verijas”, gracias por ser un señor más bonito que las flores. Eloísa del Río, eres una mujer en toda la extensión de la palabra, tu valentía y fortaleza son ejemplo a seguir, gracias por tu amor incondicional.

A mis padres, que a pesar de la distancia siempre están atentos de mis logros, que desde el principio de esta aventura y hasta el día de hoy siguen dándome ánimo para no detenerme en el camino, que de forma incondicional entendieron mis ausencias y mis malos momentos. A ellos les dedico este documento que refleja mis experiencias aprendidas en estos años y mis motivos para seguir por un mejor desempeño.

Eslí Hirepan

Agradecimientos

Me gustaría que estas líneas sirvieran para expresar mi más profundo y sincero agradecimiento a todas aquellas personas que con su ayuda han colaborado en la realización del presente trabajo, en especial al Dr. Fernando J. González Villarreal, director de este proyecto, por la orientación, el seguimiento y la supervisión del mismo, pero sobre todo por la motivación y el apoyo recibido a lo largo de estos años.

Especial reconocimiento merece el interés mostrado por mi trabajo y las sugerencias recibidas de mi gran amigo Fernando González Cáñez, con quien me encuentro en deuda por el ánimo infundido y la confianza en mí depositada.

Con estas palabras quiero certificar unas humildes gracias a mi familia. Agradezco todas esas sonrisas, los momentos, la eterna ayuda, las cenas, los almuerzos, las fiestas, los brindis, las reuniones en intimidad a salvo de un mundo que a veces no entiende lo que significa querer, ser, verdad. Esas manifestaciones de amor, confianza y apoyo incondicionales son motivo de alegrías dignas de compartir con el mundo.

Un agradecimiento muy especial merece la comprensión, paciencia y el ánimo recibidos de mis amigos. A todos ellos, muchas gracias.

Eslí Hirepan

Índice de Contenido

Introducción	1
Hipótesis	2
Objetivo	2
1.0 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.1 Demanda de agua en la Zona Metropolitana del Valle de México	3
1.2 Fuentes de abastecimiento potenciales.....	4
1.3 Descripción general del Valle del Mezquital, Hidalgo	6
2.0 MARCO TEÓRICO.....	8
2.1 El reúso del agua	8
2.2 El reúso del agua en México	9
2.3 Tecnología al servicio de la naturaleza	11
2.4 Reúso potable	12
2.4.1 Reúso Potable Directo.....	13
2.4.2 Estudios de caso sobre el reúso potable directo	13
2.4.3 Reúso Potable Indirecto	15
2.4.4 Estudios de caso sobre el reúso potable directo	15
2.5 Planeación del reúso potable y criterios para seleccionar alternativas.....	16
2.6 Un nuevo enfoque de disponibilidad.....	20
2.7 Cambios en la regulación	21
3.0 METODOLOGÍA	22
3.1 Estudios de calidad del agua en el Valle del Mezquital	22
3.1.1 Evaluación de la calidad del agua	24
3.1.2 Análisis de la información.....	24
3.2 Tratamiento vs Contaminantes.....	30
3.3 Diseño de esquema multibarreras.....	32
3.3.1 Suelo - Acuífero	33
3.3.2 Acondicionamiento	34
3.3.3 Embalse	35

3.3.4	Potabilización	36
3.3.5	Manejo de Lodos	37
3.4	Consideraciones adicionales	38
4.0	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	39
4.1	Verificación de la hipótesis	39
4.2	Programa de muestreo y pruebas de jarras	39
	Referencias bibliográficas	42
	Anexo A: Base de datos de las diversas fuentes de información sobre la calidad del agua subterránea del Valle del Mezquital	48
	Anexo B: Análisis de frecuencias de los datos recopilados.....	61
	Anexo C: Normatividad en materia de agua para abastecimiento.....	76

Índice de Tablas

Tabla 1.	Suministro de Agua a la Zona Metropolitana del Valle de México	4
Tabla 2.	Ventajas y desventajas del uso de aguas residuales en la agricultura	11
Tabla 3.	Ejemplos de barreras, riesgos a discutir y alternativas de manejo de riesgos.	17
Tabla 4.	Parámetros regulados por la NOM 127 SSA1 1994.....	22
Tabla 5.	Calidad promedio del agua de pozo de los acuíferos del Valle del Mezquital.....	26
Tabla 6.	Procesos de autopurificación de las aguas subterráneas	29
Tabla 7.	Parámetros que sobrepasan el valor de la norma nacional y los criterios internacionales de agua potable en los acuíferos del Valle del Mezquital vs. Procesos de tratamiento comúnmente empleados para eliminar ciertos contaminantes.	30
Tabla 8.	Objetivos de tratamiento por familias de contaminantes	31
Tabla 9.	Comparación de calidad del agua: SAT Valle del Mezquital vs. Ley Federal de Derechos.....	34
Tabla 10.	Parámetros para evaluar la calidad del agua de los acuíferos del Valle del Mezquital	41
Tabla 11.	Información general de los pozos muestreados en el Valle del Mezquital	48
Tabla 12.	Calidad Físico Química de algunos pozos en el Valle del Mezquital	49
Tabla 13.	Parámetros inorgánicos de algunos pozos en el Valle del Mezquital	50
Tabla 14.	Parámetros inorgánicos de algunos pozos en el Valle del Mezquital (continuación)	51
Tabla 15.	Parámetros inorgánicos detectados en algunos pozos del Valle del Mezquital (continuación)	53
Tabla 16.	Parámetros inorgánicos detectados en algunos pozos del Valle del Mezquital (continuación)	54
Tabla 17.	Parámetros inorgánicos detectados en algunos pozos del Valle del Mezquital (continuación)	55
Tabla 18.	Parámetros microbiológicos analizados en algunos pozos del Valle del Mezquital	57
Tabla 19.	Compuestos orgánicos identificados en algunos pozos del Valle del Mezquital	58
Tabla 20.	Radiactividad medida como Uranio en algunos pozos del Valle del Mezquital	58
Tabla 21.	Trihalometanos y subproductos de desinfección medidos en algunos pozos del Valle del Mezquital.....	58
Tabla 22.	Plaguicidas y herbicidas determinados en algunos pozos del Valle del Mezquital.....	59
Tabla 23.	Plaguicidas y herbicidas determinados en algunos pozos del Valle del Mezquital (continuación)	59
Tabla 24.	Otros parámetros determinados en algunos pozos del Valle del Mezquital.....	60
Tabla 25.	Normatividad mexicana y criterios internacionales en materia de agua para abastecimiento.....	76

Índice de Figuras

Figura 1. Poblamiento del Valle de México durante el Siglo XX.....	3
Figura 2. Zonas que cuentan con estudios para transferir agua a la ZMVM.....	5
Figura 3. Ubicación del Valle del Mezquital, Hidalgo.....	6
Figura 4. Modificación en el paisaje del valle del Mezquital, Hidalgo, debido al riego con aguas residuales.....	7
Figura 5. Usos consuntivos de agua en México.	9
Figura 6. Reúso del agua residual en México.....	10
Figura 7. Algunas fuentes de abastecimiento del Valle del Mezquital.....	23
Figura 8. Esquema del Sistema de Tratamiento Suelo-Acuífero.....	29
Figura 9. Esquema general de potabilización del Valle del Mezquital.....	32
Figura 10. Funcionamiento del sistema SAT en el valle del Mezquital.....	33
Figura 11. Proceso de Acondicionamiento.....	35
Figura 12. Proceso de Potabilización.....	37
Figura 13. Proceso de manejo de lodos generados.....	38
Figura 14. Frecuencia de datos para Aluminio.....	61
Figura 15. Frecuencia de datos para Alcalinidad.....	62
Figura 16. Frecuencia de datos para Antimonio.....	62
Figura 17. Frecuencia de datos para Bario.....	63
Figura 18. Frecuencia de datos para Boro.....	63
Figura 19. Frecuencia de datos para Calcio.....	64
Figura 20. Frecuencia de datos para Cadmio.....	64
Figura 21. Frecuencia de datos para Cloruros.....	65
Figura 22. Frecuencia de datos para Demanda Bioquímica de Oxígeno.....	65
Figura 23. Frecuencia de datos para Cobre.....	66
Figura 24. Frecuencia de datos para Carbono Orgánico Total.....	66
Figura 25. Frecuencia de datos para Cromo.....	67
Figura 26. Frecuencia de datos para Dureza Total.....	67
Figura 27. Frecuencia de datos para Demanda Química de Oxígeno.....	68
Figura 28. Frecuencia de datos para Turbiedad.....	68
Figura 29. Frecuencia de datos para Tolueno.....	69
Figura 30. Frecuencia de datos para Sólidos Disueltos Totales.....	69
Figura 31. Frecuencia de datos para Sustancias Activas al Azul de Metileno.....	70
Figura 32. Frecuencia de datos para Nitrógeno Amoniacal.....	70
Figura 33. Frecuencia de datos para Magnesio.....	71
Figura 34. Frecuencia de datos para Manganeso.....	71

Figura 35. Frecuencia de datos para Molibdeno.....	72
Figura 36. Frecuencia de datos para Níquel	72
Figura 37. Frecuencia de datos para Nitratos	73
Figura 38. Frecuencia de datos para Plomo.....	73
Figura 39. Frecuencia de datos para Silicio.....	74
Figura 40. Frecuencia de datos para Sodio.....	74
Figura 41. Frecuencia de datos para Sulfatos	75
Figura 42. Frecuencia de datos para Zinc.....	75

Introducción

La disponibilidad de agua para el abastecimiento de grandes centros urbanos a nivel nacional e internacional se ha visto menguada por diversos factores como la sobrepoblación, que somete al medio natural a una presión excesiva al aumentar la demanda de los servicios de agua potable.

El comportamiento de los mantos subterráneos de la cuenca del río Tula se comenzó a estudiar, con miras a su aprovechamiento, desde la década de 1970 por su abundante recarga con las aguas residuales del Valle de México utilizadas para riego. Evaluaciones geohidrológicas recientes afirman que la disponibilidad de los acuíferos de la región es superior a los 9 m³/s. El aprovechamiento del agua de los acuíferos del Valle del Mezquital significa una nueva fuente para el abastecimiento de zonas conurbadas como Actopan – Pachuca o la Zona Metropolitana del Valle de México.

Este trabajo de tesis consta de cinco capítulos y pretende establecer la viabilidad de potabilización de las aguas subterráneas de los acuíferos del Valle del Mezquital como una solución a la falta de disponibilidad de fuentes sustentables de agua potable en el Valle de México mediante un aprovechamiento intensivo que promueve la aceleración de los procesos naturales de repurificación en el ciclo hidrológico del agua.

El primer capítulo plantea la problemática general acerca del déficit de agua potable en la Zona Metropolitana del Valle de México y la posibilidad de emplear el agua de los acuíferos del Valle del Mezquital, previo tratamiento, como fuente de abastecimiento. En el segundo capítulo se presenta una recopilación bibliográfica sobre el reúso de agua y sus variantes, así como algunos ejemplos de reúso a nivel nacional e internacional; se plantean también algunas discusiones sobre el nuevo enfoque de disponibilidad y la tecnología aplicable.

El tercer capítulo se detalla la metodología utilizada para desarrollar el análisis de procesos de tratamiento a nivel teórico referente a la proposición de procesos de tratamiento recomendables en función de los contaminantes de los acuíferos del Valle del Mezquital. En ese capítulo se presentan los resultados de la calidad del agua en diversos estudios realizados para la región, esta información fue organizada y analizada para determinar los procesos de tratamiento adecuados haciendo una comparación con la Norma Oficial Mexicana para agua de consumo humano NOM-SSA1-127-1994 así como con los criterios y normas internacionales respectivas de mayor relevancia (OMS, EPA y UE) y el proyecto de norma PROY-NOM-SSA1-250-2007.

El capítulo cuarto contiene la descripción del sistema de barreras múltiples propuesto para la potabilización del agua de los acuíferos del Valle del Mezquital y su viabilidad en función de la efectividad en la remoción de contaminantes. En el quinto capítulo se presentan las conclusiones de este trabajo y la evaluación del cumplimiento de la hipótesis planteada, además se presentan recomendaciones sobre la rectificación o ratificación de la calidad del agua en función de un programa de muestreo específico y la implementación de pruebas de tratabilidad para reafirmar o descartar los procesos de tratamiento seleccionados.

Este documento se complementa con un apartado sobre las referencias utilizadas para la realización de este trabajo de tesis y tres anexos que contienen las bases de datos correspondientes a la revisión bibliográfica sobre la calidad del agua subterránea del Valle del Mezquital, el análisis de frecuencias para la segregación de datos y determinación de los grupos o familias para tratamiento, y los criterios y estándares nacional e internacionales en materia de agua para abastecimiento.

Hipótesis

El Valle del Mezquital, Hidalgo, podría constituirse como una fuente apta para el reúso potable indirecto y como fuente alternativa para el abastecimiento de zonas urbanas como Tizayuca–Pachuca y la Zona Metropolitana del Valle de México, que requieren de una nueva fuente para satisfacer su déficit.

Objetivo

El objetivo de este trabajo de tesis es analizar y determinar la factibilidad de emplear con fines potables el agua de los acuíferos del Valle del Mezquital, Hidalgo, y establecerla como una “nueva” fuente de abastecimiento en un contexto de seguridad y confiabilidad.

1.0 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Demanda de agua en la Zona Metropolitana del Valle de México

El desarrollo de la ciudad de México ha pasado por distintos procesos territoriales y formas urbanas. La ciudad lacustre de los Aztecas sirvió como base originaria para la amalgama urbanística que dio lugar a la ciudad virreinal que ha pasado por diversas etapas marcadas por un constante crecimiento demográfico y expansión territorial, intensificándose durante el siglo XX, multiplicando 20 veces la población en el Valle de México (Figura 1) y con ella, la demanda de suelo y agua; se desecaron los lagos, deforestaron los bosques y se extrae del acuífero más de dos veces su capacidad de renovación natural.

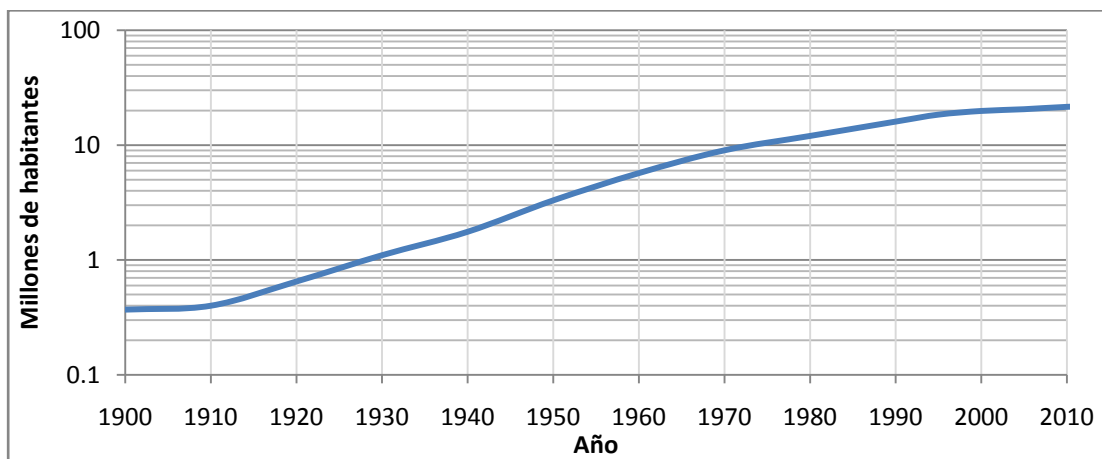


Figura 1. Poblamiento del Valle de México durante el Siglo XX.

La Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) enfrenta un acelerado proceso de metropolización. El rápido crecimiento de los últimos 50 años se ha caracterizado tanto por la expansión de áreas urbanas y residenciales planeadas para las clases media y alta, como por las invasiones ilegales de tierra y los asentamientos no planificados en las áreas periféricas. Al incorporarse a municipios conurbados del Estado de México e Hidalgo se conforma la zona metropolitana más grande del país.

La Ciudad de México obtiene más del 60% de su suministro de agua del sistema acuífero que se extiende bajo el área metropolitana, cuyos niveles se ven afectados y presentan una baja promedio de 1m/año en áreas específicas, al mismo tiempo, la expansión de la ZMVM a futuro significará también la deforestación de una parte significativa de las áreas circundantes que ahora funcionan como reguladores hidrológicos del ya seriamente alterado ciclo del agua de la cuenca de México.

La sobreexplotación del acuífero representa uno de los principales problemas de la falta de sustentabilidad ambiental de la ZMVM. De acuerdo con datos de CONAGUA desde la década de 1950 se rebasó el límite de sustentabilidad y se extrae más de lo que se recarga, en la década de los noventa se preveía que los acuíferos del Valle de México se encontrarían en situación crítica para el año 2025, sin embargo esa situación se aceleró y encontramos ya, en el 2010, algunas de las condiciones críticas previstas entonces.

El suministro actual para la ZMVM es de 61 m³/s, de los cuales 32 m³/s son para el Distrito Federal y el resto para los municipios conurbados del Estado de México. El consumo promedio en el D.F. es de 20 m³/s y los 12 m³/s restantes corresponden fundamentalmente al agua no contabilizada, parte de la cual es debido a las fugas de la red. Para la zona conurbada del Estado de México se tiene un consumo promedio de 17 m³/s y se estima que las pérdidas son equivalentes a las del Distrito Federal. En relación con lo anterior la visión de la

CONAGUA, expresada en el VI Encuentro Nacional de Cultura del Agua¹, señala que el déficit de agua en el Valle de México se está atendiendo a costa de la sobreexplotación de los acuíferos, y es insostenible en el largo plazo.

Tabla 1. Suministro de Agua a la Zona Metropolitana del Valle de México

	Fuentes	Distrito Federal	Estado de México	Totales	%	
					De fuente	Del total
SUBTERRÁNEAS	Acuíferos del Valle de México	17,7	23,2	40,9	90	67
	Sistema Lerma	3,5	0,9	4,4	10	7
	<i>Subtotales</i>	<i>21,2</i>	<i>24,1</i>	<i>45,3</i>	<i>100</i>	<i>74</i>
SUPERFICIALES	Sistema Cutzamala	9,6	4,9	14,5	91	24
	Presa Madín y manantiales	1,0	0,4	1,4	9	2
	<i>Subtotales</i>	<i>10,6</i>	<i>5,3</i>	<i>15,9</i>	<i>100</i>	<i>26</i>
TOTAL		31,8	29,4	61,2	100	

Fuente: Sistema de Aguas de la Ciudad de México, Comisión Nacional del Agua.

El déficit actual en la ZMVM es de 6 m³/s (3 m³/s en el D.F.) y se estima que se duplicará en los siguientes cuarenta años [SACM, 2009; Capella, 2008]. La proyección de la demanda considera el consumo de los usuarios mediante una dotación media similar a la actual y las pérdidas del sistema que podrían disminuir. Los niveles de explotación actuales duplican la capacidad de recarga de los acuíferos del Valle de México observando consecuencias graves en el suelo y agua del Valle.

Para alcanzar la sustentabilidad Hídrica del Valle de México sería necesario llevar a cabo las siguientes acciones de manera combinada: (i) Es necesaria la construcción de infraestructura de fuentes adicionales para el abastecimiento del Valle de México y su Zona Metropolitana; (ii) Reducir la demanda neta 20% (reducción del consumo e incremento de la eficiencia física); y, (iii) Restringir al mínimo el uso del “agua blanca” para fines de riego agrícola y usos no potables dentro del Valle de México. [SACM, 2009]

1.2 Fuentes de abastecimiento potenciales

Satisfacer la demanda de la ZMVM requiere de diversos tipos de fuentes de agua de acuerdo con la proyección de la demanda y las condiciones de abastecimiento actual. En diversos foros se han propuesto las siguientes acciones:

- Recarga artificial con agua de lluvia.
- Captaciones adicionales en ríos del Valle de México.
- Reúso del agua residual tratada.
- Recarga artificial con agua residual tratada.
- Importación de agua desde fuentes distantes

Cada una de estas alternativas ha generado proyectos que pueden ayudar a satisfacer la demanda de la ZMVM y se analizan los posibles efectos de la implementación de los mismos. Para el caso de la importación de agua desde fuentes distantes se puede asegurar que no existen fuentes de fácil acceso (económico y social) para el Valle de México. Se han realizado estudios en diversas cuencas vecinas al Valle de México para importar nuevos caudales que permitan complementar la oferta actual y reducir la sobreexplotación de los acuíferos del Valle. Las alternativas más estudiadas son las cuencas de: Cutzamala, Tecolutla, Amacuzac y Valle del Mezquital, Hidalgo (Figura 2).

¹ Ciudad de México, 29 y 30 de enero de 2009.

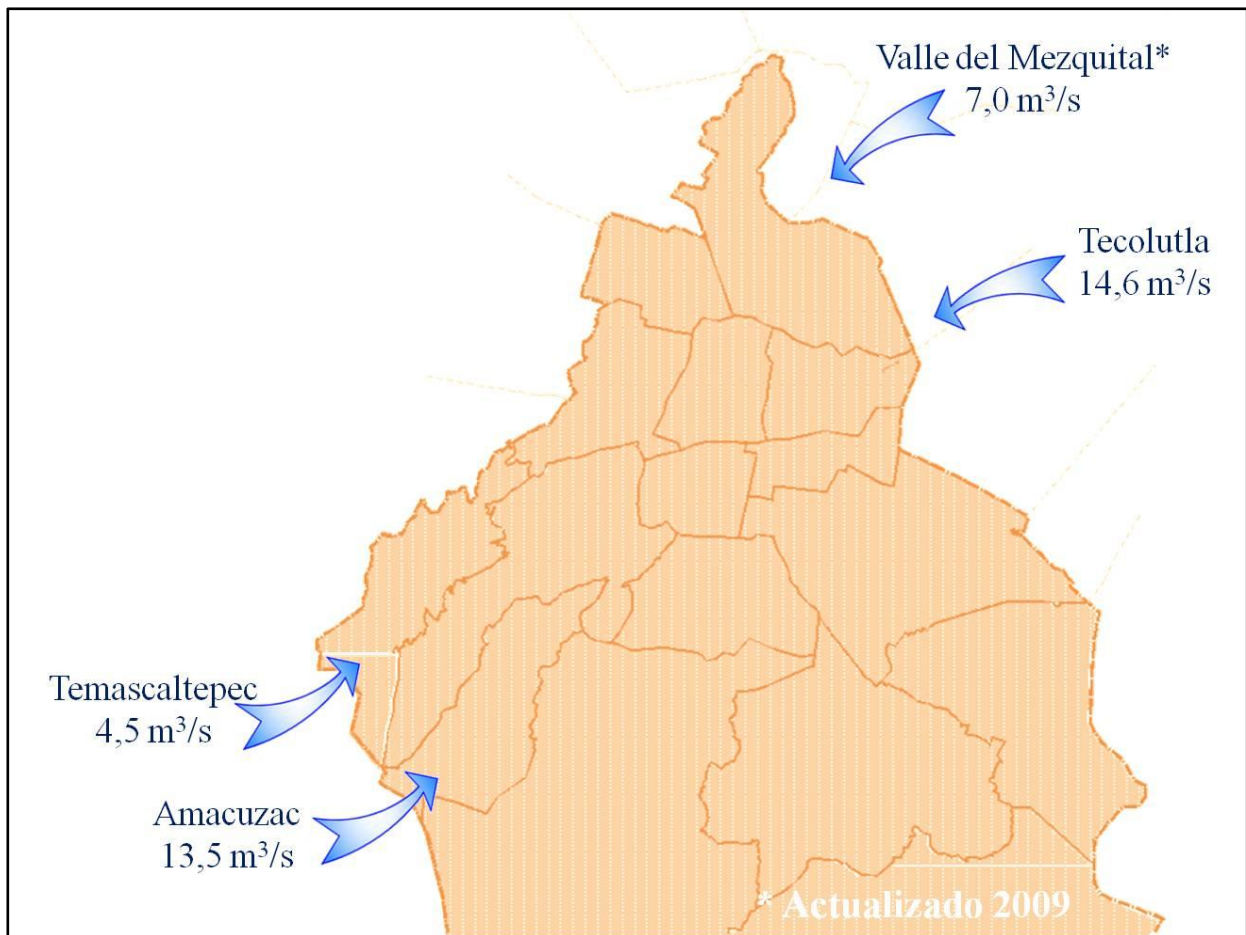


Figura 2. Zonas que cuentan con estudios para transferir agua a la ZMVM

⊕ *Cutzamala, 4ª Etapa*

El proyecto Temascaltepec (4ª etapa de Cutzamala), puede considerarse la alternativa más viable ya que la conducción está construida y las obras de potabilización y llegada cuentan con la capacidad para manejar y distribuir el nuevo caudal. Sin embargo, para ser factible está sujeta a lograr nuevas negociaciones para sortear las dificultades de orden social y de tenencia de la tierra.

⊕ *Tecolutla*

Este proyecto, como en el caso del Cutzamala, cambiaría el uso de Generación Hidroeléctrica a Agua Potable en las presas Necaxa y Mazatepec, ubicadas sobre el Río Tecolutla. Se construiría un acueducto de 130 km de longitud para 14,6 m³/s, 4 Plantas de Bombeo para vencer 1180 metros de carga, una presa y vasos reguladores, para llegar al cerro Chiconautla por el rumbo de Ecatepec.

⊕ *Amacuzac*

Con este proyecto se captarían las aguas del alto Río Amacuzac, dentro del Estado de México, mediante dos presas, la Presa Chontalcutlán y la Presa Totolmajac, seis plantas de bombeo para vencer un desnivel de 1578 metros, un acueducto de 107 km de longitud para 13,5 m³/s y una planta potabilizadora.

Proyecto de alta complejidad por la oposición social que se ha venido manifestando a lo largo de los años. En esta región se observa una demanda y aprovechamiento del agua disponible para riego y agua potable locales hasta por 6 o 7 m³/s.

⊕ Valle del Mezquital, Hidalgo.

El aprovechamiento del valle del Mezquital (valle de Tula) se ha manejado como una fuente alterna para la importación del agua, sin embargo, las corrientes de pensamiento y desarrollo más aceptadas a nivel internacional obligan a ver el aprovechamiento como un *proyecto de reúso indirecto* por lo que se debe considerar un sistema multibarreras para garantizar la calidad y seguridad del agua. El *Sistema de Reúso Potable Indirecto del Valle del Mezquital al Valle de México* funcionaría como uno de los casos de reúso del agua más importantes a nivel mundial.

1.3 Descripción general del Valle del Mezquital, Hidalgo

El valle del Mezquital, se localiza en la parte suroeste del estado de Hidalgo, 50 km al norte de la Ciudad de México y a una altura de 2030 msnm (Figura 3). El suelo del valle se compone de tierras calcáreas semiáridas que son, en su origen, pobres en materia orgánica y nutrientes [Torres, 2001]. El clima que predomina es seco estepario, la precipitación y evapotranspiración media anual es de 408 y 2088 mm, respectivamente.

Esta región se ha convertido en uno de los ejemplos más importantes de cambio en las condiciones naturales por acciones antropogénicas (Figura 4). Desde 1886² se inició el riego de cultivos agrícolas con agua residual sin tratamiento en el valle, las altas concentraciones de materia orgánica y nutrientes presentes en el agua residual (DBO, nitrógeno y fósforo) han favorecido el incremento en la productividad agrícola [Jiménez *et al.*, 2008], beneficiando sustancialmente a la región.

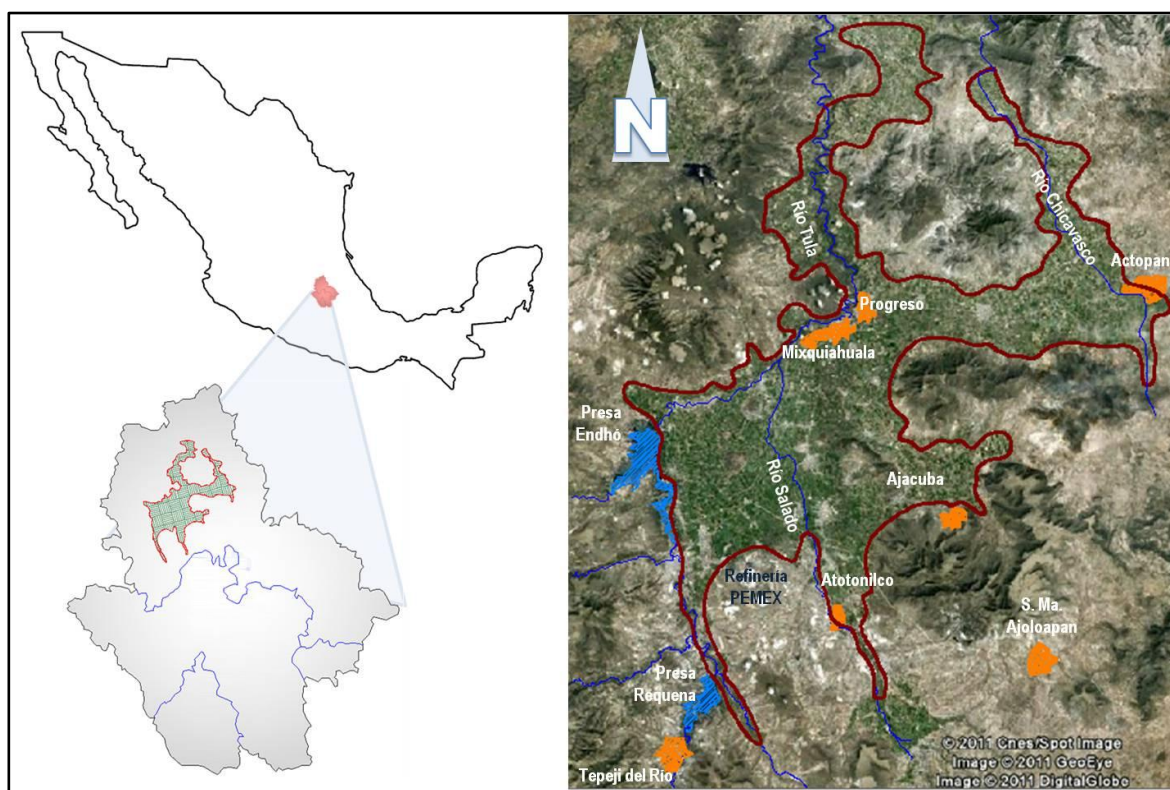


Figura 3. Ubicación del Valle del Mezquital, Hidalgo.

² Inauguración oficial del Distrito de Riego 003 Tula

En la zona se tienen tres Distritos de Riego: DR 003 Tula, DR 100 Ixmiquilpan y DR 112 Ajacuba, que para 2009 sumaron 81 926 ha reconocidas en las que se registró en promedio una productividad de 46,76 ton/ha con un valor de cosecha de 1759,5 millones de pesos, lo que indica un rendimiento de \$ 21 480 pesos por hectárea [CONAGUA, 2010]. Actualmente se riegan más de 90 000 ha en la región.



Figura 4. Modificación en el paisaje del valle del Mezquital, Hidalgo, debido al riego con aguas residuales

Al interior de los distritos de riego, la distribución del agua residual se realiza a través de un sistema de canales no revestidos, lo que ha dado lugar a la recarga artificial e indirecta de los acuíferos locales [OMS, 2003]. La técnica de riego por inundación, el transporte y almacenamiento en la infraestructura agrícola, han ocasionado un incremento en la infiltración al subsuelo, la recarga estimada es de 28 m³/s [BGS³, 1998] y ha modificado la hidrogeología y sobresaturado el acuífero; en los acuíferos locales ya se han presentado afloramientos [BGS, 1998; Jiménez *et al.*, 2004].

En algunas zonas de la región, el agua infiltrada se extrae para complementar el riego agrícola (realizando mezclas con agua residual) y es además usada como fuente de suministro para satisfacer la demanda de diversas poblaciones de la región; este segundo uso se está volviendo común, provocando un reúso potable no planeado, sin considerar las prácticas de ingeniería o de seguridad sanitaria que se han ejercido en otras partes.

³ *British Geological Survey*. Agencia británica de estudios geológicos.

2.0 MARCO TEÓRICO

2.1 El reúso del agua

El reciclaje del agua es la reutilización de aguas residuales tratadas para fines beneficiosos, tales como la producción de alimentos (riego agrícola) y el paisaje, procesos industriales, descargas sanitarias y la renovación de una cuenca de agua subterránea (recarga de acuíferos). El reúso del agua es un término que se utiliza generalmente como sinónimo de reciclaje de agua, regeneración de agua y reutilización de agua [EPA, 2010].

Como la escasez de agua y la demanda sobre las fuentes renovables de agua han aumentado, la necesidad de reusar agua se ha incrementado, la cuestión sobre el tema del reúso del agua se enfoca en dos preguntas fundamentales: ¿el agua siempre es de reúso?, y ¿hasta dónde la naturaleza puede? A través del ciclo natural del agua la naturaleza ha reciclado y reutilizado el agua durante millones de años, el reúso del agua sin embargo, generalmente se refiere a los proyectos que utilizan la tecnología para acelerar el ciclo hidrológico y aproximar el reúso real al punto donde el agua se considera un residuo.

En muchos países desarrollados se emplean recursos hídricos que incluyen agua que ha sido utilizada por lo menos una vez, el reúso del agua es a menudo caracterizado como "planificado" o "no planificado". Un ejemplo común de reúso de agua no planificado se produce cuando las ciudades obtienen su suministro de agua de los ríos, como el Río Colorado y el Río Támesis, en Londres, que reciben descargas de aguas residuales aguas arriba de las ciudades. El agua de estos ríos ha sido reutilizada, tratada, y entubada para el suministro de agua varias veces antes de que llegue al usuario final. El uso intensivo de agua es típicamente resultado del reúso indirecto potable (planeado o no planeado), aunque probablemente existan fuentes de agua, incluyendo los acuíferos profundos, al servicio de las necesidades de agua potable de grandes poblaciones que están completamente libres de agua utilizada anteriormente.

El reúso planeado nace del deseo de una alternativa para la descarga de aguas residuales municipales en los cuerpos de agua superficiales para los que se desarrollan proyectos con el objetivo de reutilizar provechosamente una fuente de agua reciclada y se ha convertido en una práctica necesaria para garantizar la disponibilidad del agua. Este tipo de proyectos ofrecen recursos y ahorros financieros ya que el tratamiento de aguas residuales puede ser adaptado para satisfacer los requisitos de calidad de agua.

La planeación y gestión de los recursos hídricos a nivel cuenca para su empleo en el servicio público son tareas complejas que implican una variedad de técnicas, instituciones, políticas, normas y reglamentos de salud pública. La complejidad de planeación crece conforme se incrementa la demanda.

Las siguientes son definiciones de términos típicamente usados para referirse a reciclaje de agua o reúso de agua⁴.

- Agua regenerada (*Reclaimed Water*). También llamada “agua reciclada” es el agua que ha sido usada por lo menos una vez (agua residual) y ha sido adecuadamente tratada para otro uso.
- Reúso potable indirecto (*Indirect Potable Reuse*). Es el proceso que deliberadamente introduce cierta cantidad de agua reciclada a un sistema natural como ríos, lagos o acuíferos, que son usados como fuente de abastecimiento.

⁴ WEF & AWWA, 2008

- Reúso potable directo (*Direct Potable Reuse*). Es el proceso que usa una parte de agua regenerada como fuente de abastecimiento de agua potable sin introducirla primero a un sistema natural de agua.
- Reúso no planeado (*Unplanned Reuse*). Es el uso incidental de agua regenerada para cualquier propósito (sin considerar de antemano y a fondo las técnicas, regulaciones, políticas públicas y económicas).
- Reúso planeado (*Planned Reuse*). Es el uso de agua reciclada para beneficio de un propósito específico después de haber considerado las técnicas, regulaciones, políticas públicas y económicas relacionadas y aplicables.

2.2 El reúso del agua en México

El uso de agua para las diferentes actividades económicas en el país es aproximadamente de 80 mil millones de m³, que se distribuyen de acuerdo con la Figura 5; el sector hidroeléctrico se contabiliza aparte por corresponder a un uso no consuntivo (que no consume agua). El 63% del agua utilizada en el país para uso consuntivo proviene de fuentes superficiales (ríos, arroyos y lagos), mientras que el 37% restante proviene de fuentes subterráneas (acuíferos)⁵.

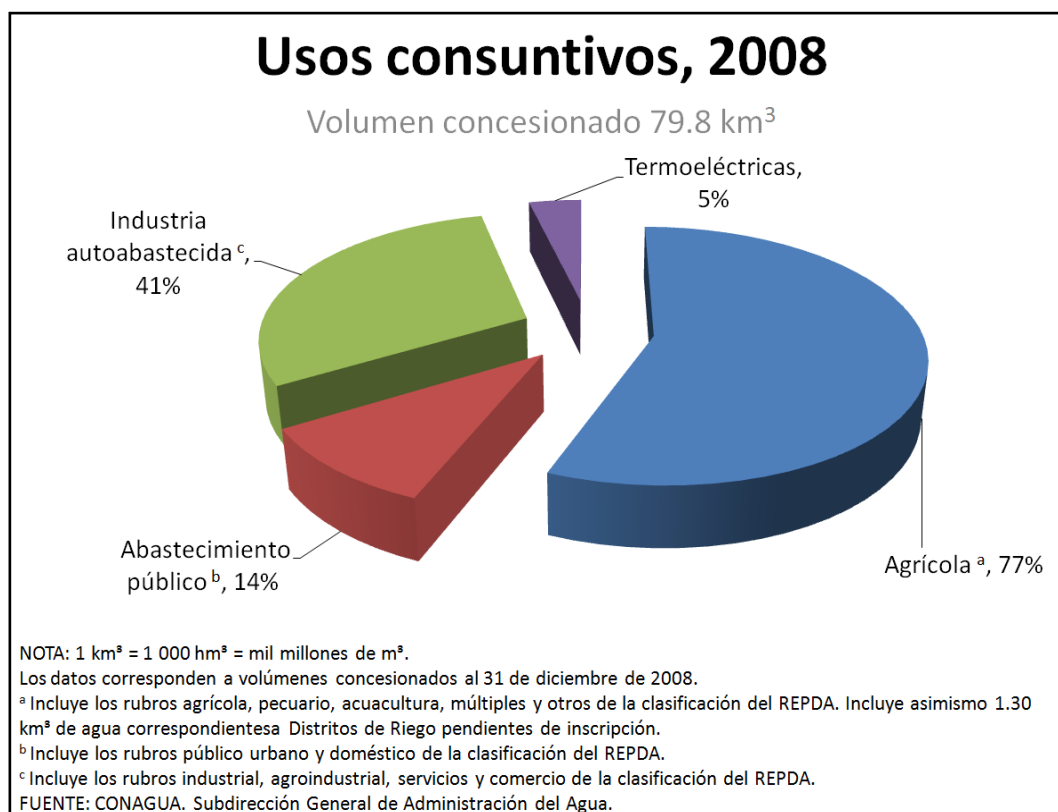


Figura 5. Usos consuntivos de agua en México.

El uso para abastecimiento público incluye a los usuarios domésticos principalmente y servicios públicos urbanos. El disponer de agua en cantidad y calidad suficiente para uso y consumo humano es una de las demandas básicas de la población, pues incide directamente en su salud y bienestar en general. El abasto con fuentes de agua limpia de primer uso es desde el punto de vista económico cada vez más costoso y desde el

⁵ Estadísticas del Agua en México, edición 2010. Comisión Nacional del Agua

político y social más difícil de negociar. Para abastecer la demanda entre los sectores altamente consumidores de agua surge la necesidad de utilizar fuentes alternas como las aguas residuales.

A nivel nacional se generan 237,5 m³/s en los centros urbanos, de los cuales se recolectan en alcantarillado 209,1 m³/s y sólo se trata el 37,1 % (88.1 m³/s) de las aguas residuales municipales que se generaron en las 2029 PTARs municipales en operación. Otros usos no municipales incluyendo a la industria, con mayor carga contaminante, generan alrededor de 190,4 m³/s de aguas residuales y sólo se trata el 19,3% en 2186 PTARs industriales en operación. Lo anterior indica que más de dos terceras partes de las aguas residuales son vertidas sin ningún tratamiento.

CONAGUA estima que en el año 2008 en México se reutilizó un caudal equivalente a 160 m³/s. Destaca el reúso de aguas residuales municipales en cultivos agrícolas y en una menor proporción en las industrias. En el reúso de agua de origen industrial (no municipal) destacan las aguas residuales de los ingenios azucareros en el cultivo de caña en el estado de Veracruz. [CONAGUA, 2011]

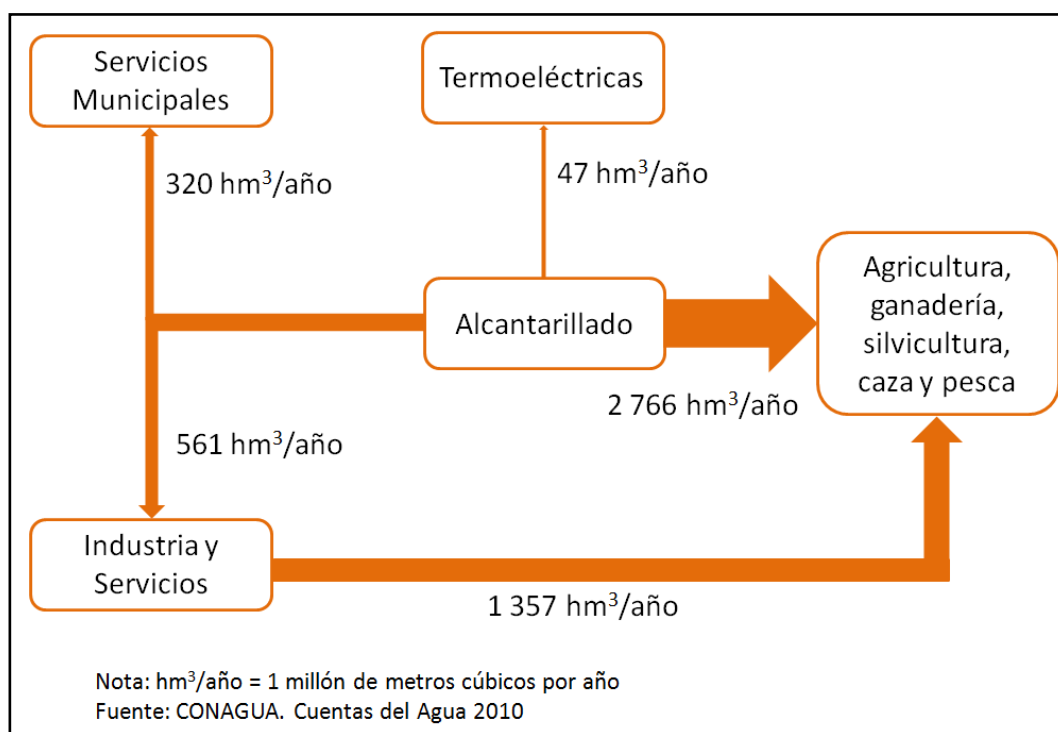


Figura 6. Reúso del agua residual en México

El esquema de la Figura 6 implica que el reúso extensivo de agua residual sin tratamiento en la agricultura sea el sector que más se beneficie con este uso. [Cisneros, ¿?]

México es líder en el reúso del agua residual para irrigación a nivel Latinoamérica [Peassey, 2000], se emplean 108 m³/s de agua residual en el riego de cultivos agrícolas [CONAGUA, 2008], lo que posiciona al país como segundo lugar a nivel mundial, después de China, en el empleo de agua residual para dichas actividades [Jaime, 2005].

Aproximadamente 350 000 hectáreas se riegan con agua residual sin tratamiento en 30 Distritos de Riego, entre los que destacan los ubicados en el Valle del Mezquital, Hgo. (003 Tula, 100 Alfajayucan y 112 Ajacuba), los cuales representan cerca del 43% de la demanda total de agua residual para riego y cerca del 30% del área irrigada en el país [CONAGUA, 2008].

El uso de las aguas residuales trae consigo diferentes ventajas y desventajas que son analizadas para implementar su uso en la agricultura ya sea en campo o en invernadero. Este uso no sería necesariamente un problema si esas aguas fuesen correctamente procesadas en plantas de tratamiento: el daño nace cuando se usan aguas sin tratar [BBCMundo.com, 2008].

Tabla 2. Ventajas y desventajas del uso de aguas residuales en la agricultura

<i>Ventajas</i>	<i>Desventajas</i>
⊕ Altas concentraciones de nutrientes (como el nitrógeno y fósforo) y materia orgánica	⊕ Riesgos a la salud
⊕ Rendimientos agronómicos por encima de la media	⊕ Las aguas residuales contienen una gran concentración de patógenos
⊕ Permite cultivar alimentos en lugares con escasez de agua o donde no hay acceso a fuentes de agua limpia.	⊕ Contiene metales pesados y otros contaminantes (en menor proporción)
⊕ Las aguas residuales (de tipo municipal) provenientes de tratamiento secundario representan una buena fuente alternativa de agua	⊕ El manejo de las aguas residuales implica mayores precauciones para los agricultores
⊕ Costo menor que el agua de primer uso	⊕ La regulación y normatividad vigentes no se aplican de manera uniforme.
⊕ Mayor disponibilidad de agua residual para riego	⊕ No es factible para todo tipo de cultivos
⊕ Cumple una función ecológica de renovación del agua.	⊕ Riesgos de contaminación química y biológica de los cultivos.
	⊕ Posible impacto ambiental por el uso extensivo de estas aguas
	⊕ Posible generación de epidemias
	⊕ Las concentraciones de contaminantes se incrementan y los cuerpos de agua no soportarán más tiempo.

2.3 Tecnología al servicio de la naturaleza

Si bien no es posible tener la certeza de que el reúso potable es cien por ciento seguro, es importante notar que un riesgo similar existe en el caso de fuentes tradicionales de abastecimiento y desalación. Pocos estudios de salud y toxicológicos se han realizado en las fuentes tradicionales de abastecimiento que están influenciadas fuertemente por descargas de aguas residuales (reúso incidental). De hecho, la preocupación por los “constituyentes traza” puede ser infundada [Snyder et al. 2006]. Una situación similar se experimenta con la desalación de agua salobre o de mar para propósitos potables, pero es menos evidente el riesgo con el uso de la llamada agua de mar “pura” como materia prima para la desalación.

Para superar las preocupaciones de riesgos a la salud se aplican los sistemas de barreras múltiples en que los procesos para remover los contaminantes se utilizan de manera secuencial y redundante, lo que resulta en una confiabilidad alta. También se ha mejorado sustancialmente el monitoreo tecnológico para hacerlo en tiempo real. Gracias a los estudios científicos y los avances tecnológicos, se han desarrollado e implementado procesos de tratamiento más fuertes, incluyendo el sistema de membrana mejorado con procesos de oxidación avanzada, que junto con otras nuevas tecnologías son capaces esencialmente de la remoción total de constituyentes traza. Es importante hacer notar que la tecnología actualmente en vigor puede usarse para producir agua con alta calidad potable que supera con creces las normas actuales para agua potable.

Las barreras de seguridad se establecen dependiendo de los riesgos asociados con sustancias particulares o contaminantes en el agua para el usuario final. Estas barreras pueden ser de tres tipos: (1) tratamiento, (2) no tratamiento, u (3) operacional. Las barreras de tratamiento se definen como: sistemas continuamente presentes para reducir sustancias no deseadas a un nivel aceptable. Las barreras de no tratamiento incluyen actividades de adecuación para la implementación y el monitoreo del proyecto. La parte operacional incide en

la posibilidad de mejorar las condiciones de los procesos de tratamiento o cualquier otro que mejore el rendimiento del proyecto.

En los sistemas de agua potable los tipos de barreras utilizadas comúnmente incluyen: (1) protección de la fuente, (2) suavización natural, (3) tratamiento efectivo, (4) integridad del sistema de distribución, (5) programas de monitoreo, y (6) respuesta a condiciones adversas.

El sistema de barreras múltiples empleado para el agua reciclada en el reúso potable indirecto incluye: (1) control de las descargas de agua residual tratada, (2) procesos de tratamiento convencional resistentes y redundantes, (3) procesos de tratamiento avanzado resistentes y redundantes, (4) incorporación a un medio natural, (5) potabilización del agua antes de su distribución en los sistemas de agua potable, y (6) respuesta a condiciones adversas. Aunque cada barrera ofrece protección ninguna barrera es perfecta, el exceso de confianza en una sola barrera de protección a expensas de otra puede incrementar el riesgo de contaminación. La combinación de fallas independientes debe ser clara, sin embargo, la combinación de muchas barreras independientes resulta en un alto nivel de confiabilidad.

2.4 Reúso potable

La práctica de desviar las fuentes de agua aguas abajo de los vertidos de aguas residuales a menudo se llama reúso incidental o reúso potable no planificado, que es una situación común en muchas localidades a nivel mundial. El reúso indirecto planeado esta incrementándose en varios países en reconocimiento de la laguna normativa que existe entre las normas para agua limpia y las normas para agua potable. El reúso potable directo no se emplea en muchos países actualmente.

Existen cuestiones de salud y regulaciones que rigen la planeación e implementación de proyectos de reúso potable, son típicamente más complejas que para un proyecto de reúso no potable, esencialmente por la precepción y los riesgos actuales de emplear agua regenerada. Los proyectos de reúso potable deliberadamente complementan el suministro de agua potable con agua reciclada, por ello tienen un inherente riesgo de salud asociado, mayor que en un proyecto de reúso no potable (p.ej. agricultura) en los que la ingesta sería poco frecuente e incidental.

En ese sentido el reúso no potable sólo está normado para parámetros microbiológicos, en cambio, el reúso potable también debe considerar las implicaciones potenciales sobre la salud a largo plazo (crónicas) asociadas al consumo de agua reciclada. En suma los proyectos de reúso potable enfrentan desafíos relacionados con la calidad del agua y con el comportamiento de la mezcla de agua regenerada con fuentes superficiales o subterráneas.

La máxima tradicional para selección de fuentes para suministro de agua potable ha sido la utilización de la fuente de más alta calidad disponible [EPA, 1976]. Sin embargo, basadas en el costo, muchas ciudades toman agua de ríos u otras fuentes que reciben descargas de aguas residuales y emplean la potabilización convencional (p.ej. filtración y desinfección) para eliminar los patógenos causantes de enfermedades transmitidas por el agua. Otras comunidades utilizan agua subterránea afectada por los lodos de desecho de aguas residuales o residuos sépticos provenientes de los lixiviados de tiraderos de basura no regulados.

Incluso con la prevalencia del reúso indirecto no planeado, algunos expertos opinan que el agua para abastecimiento proveniente del agua residual es inminentemente más riesgosa, aún cuando el agua regenerada cumpla con las normas para agua potable [NRC, 1994, 1998]. Estos aspectos incluyen:

- La desinfección del agua regenerada puede crear diferentes y a menudo desconocidos subproductos de desinfección que no se encuentran en las fuentes convencionales de suministro.

- Sólo un pequeño porcentaje de compuestos orgánicos en el agua potable están identificados y sólo de algunos de ellos se conocen los efectos sobre la salud.
- Los efectos sobre la salud de la mezcla de dos o más de los cientos de componentes de las aguas recicladas usadas para propósitos potables no están caracterizados
- Todo el proceso se basa en tecnología y gestión.

Si bien estos problemas no son insuperables, ilustran la necesidad de reconocer la complejidad para tratar las cuestiones de salud y normatividad (relacionada con la salud pública, calidad del agua y protección ambiental), que deben ser evaluados y acondicionados para los proyectos de reúso potable. Muchos de estos aspectos son comunes para el agua potable, no sólo para el agua regenerada.

2.4.1 Reúso Potable Directo

Los proyectos de reúso potable directo son implementados comúnmente como resultado de circunstancias extremas, cuando otras alternativas de agua potable tienen costos inaccesibles o no son viables. Dependiendo de las condiciones particulares, los proyectos de reúso directo pueden ser temporales, como en situaciones de sequía extrema, o a largo plazo, por ejemplo cuando no existe suficiencia en una fuente de abastecimiento. En cualquier caso, existen temas importantes asociados con la práctica del reúso potable directo, que incluyen: percepción pública, riesgos de salud pública, capacidades técnicas y costos.

A continuación se presentan dos estudios de caso sobre el reúso potable directo que ejemplifican las condiciones que llevan a proponer y ejecutar proyectos de esta índole. Se exponen también los beneficios obtenidos en ambas ciudades.

2.4.2 Estudios de caso sobre el reúso potable directo

⊕ Chanute, Kansas.

Durante una sequía que duró de 1952 a 1957, en la ciudad de Chanute (12,000 habitantes aprox.), ocurrió un caso de reúso potable directo de Octubre de 1956 a Marzo de 1957. El sistema de reciclaje de agua consistía en tratamiento primario y secundario (filtros por goteo), tanque de estabilización, planta de potabilización y sistema de distribución; un ciclo completo de tratamiento que hasta el momento requiere de 20 días [Metcalf & Eddy, 2007].

El río Neosho era la fuente de abastecimiento para la ciudad, en el quinto año de sequía (verano de 1956) el río se seco. Las autoridades de la ciudad debían actuar rápido pues la condición de sequía no iba a cambiar pronto, investigaron y consideraron diversas alternativas de acción: (i) Dejar de abastecer a la industria y conservar el agua disponible para el uso doméstico; (ii) Un sistema de abastecimiento por pozos, aunque el agua subterránea tenía una dureza total de 725 mg/L y un contenido de sulfatos de 630 mg/L; (iii) Transportar agua potable en camiones o tren (un dólar por metro cúbico), el costo y las limitaciones físicas causaron el rechazo; (iv) Unirse a otras ciudades para bombear agua desde el río Smoky Hill hasta el extremo superior del río Neosho, si la sequía hubiese continuado en 1957 esta alternativa sin duda habría recibido mayor consideración.

La propuesta final fue la recirculación de las aguas residuales tratadas y las autoridades locales decidieron seguirla. Construyeron una represa sobre el río Neosho que retuviera el agua residual tratada aguas arriba de la toma de agua para abastecimiento, la represa tuvo una función muy efectiva como tanque de estabilización con un tiempo de retención de 17 días. La calidad del agua siempre cumplió con los requisitos bacteriológicos de las normas de salud pública por el buen tratamiento y los múltiples puntos de cloración, sin embargo el agua comenzó a tomar un color amarillo pálido y un desagradable sabor y olor a humedad (por la acumulación de nitrógeno). El rápido incremento en la concentración de sales disueltas y materia orgánica no

eran fáciles de remover por tratamientos convencionales, se necesitaba más información sobre como elaborar un tratamiento efectivo que pudiese remover algunos de estos contaminantes.

Un estudio epidemiológico mostro apenas poca diferencia en los casos de enfermedades gastrointestinales entre la etapa de reúso potable directo y el último invierno que se usó agua del río. Quedaban muchas preguntas sin responder sobre la seguridad de agua reciclada desde el punto de vista de salud pública, a pesar de los resultados aparentemente favorables obtenidos en el estudio. La tecnología en el laboratorio de la planta de tratamiento no era adecuada para la detección de algunos contaminantes que afectan a la salud.

La experiencia que deja este proyecto, entre otras cosas, es identificar la relación directa entre los detergentes sintéticos (no biodegradables) con la espuma y las características estéticas como el color y el olor en el agua regenerada. La tecnología de Carbón Activado no estaba lista y las membranas y oxidación avanzada estarían disponibles hasta 10 o 15 años después. En relación con la cloración, el descubrimiento de los trihalometanos (subproductos de la desinfección) se dio hasta finales de la década de 1970.

⊕ *Windhoek, Namibia.*

La ciudad de Windhoek (1,8 millones de habitantes) se ubica en una de las zonas más áridas de África y desde 1968 incorpora agua regenerada a su sistema de abastecimiento. La mezcla de agua reciclada con agua potable tiene lugar directamente en las líneas de distribución de agua potable. La *Planta de Regeneración de Agua Goreangab* (PRAG) es pionera en el reúso potable directo y actualmente es la única operando a nivel mundial, es el mejor ejemplo de reúso de agua reciclada [Metcalf & Eddy, 2007].

La lluvia promedio en la región es de 360 mm y la evaporación supera los 3400 mm y es por lo tanto el mayor consumidor de agua. El 70% del abastecimiento proviene del agua de lluvia, que se almacena en tres represas construidas sobre el cauce de los ríos que se encuentran entre 70 y 160 km de distancia. Con el incremento poblacional se inició la explotación del agua subterránea por medio de pozos profundos.

La ciudad está dentro de la zona de captación de la presa Goreangab, por lo que a menudo la calidad de este depósito es peor que el agua residual tratada. En 1969 la planta de tratamiento Goreangab fue convertida para tratar más que el agua de la presa, recibiría el efluente de la planta de tratamiento de aguas municipales; entonces había nacido la PRAG, el agua regenerada es mezclada con el agua del acuífero. Desde el origen, una de las consideraciones para el agua regenerada fue separar los efluentes industriales de los domésticos y tratarlos en dos plantas distintas.

El proyecto ha enfrentado diversas dificultades, como la reconstrucción de la PRAG considerando un sistema de barreras múltiples, procesos de selección, percepción pública, operación, mantenimiento y desarrollo de lineamientos de reúso. El tren de tratamiento más reciente se compone de diversos conceptos y barreras de seguridad para garantizar la remoción total de impurezas. Este tren se compone de: adición de Carbón Activado en Polvo (CAP) > Pre-Ozonación > Coagulación/Floculación > Filtración DAF > Filtros rápidos de arena > Ozonación > Carbón Activado Granular > Ultrafiltración > Cloración > Adición de NaOH (ajuste de pH) > Mezclado y distribución. Como se puede ver, el agua residual municipal con un tratamiento “elevado” puede ser reusada exitosamente con propósitos potables.

En el caso de Windhoek, una combinación de factores y la falta de otras alternativas, hicieron el reúso potable directo una solución viable, aún en términos económicos. Es notorio que existe la tecnología para producir agua que cumpla con las normas y lineamientos para consumo humano en condiciones de seguridad y confiabilidad. Este proyecto es un excelente ejemplo de una práctica innovadora en un país de bajos recursos. El reúso potable directo en Windhoek demuestra que es posible superar las dificultades por la percepción pública y los prejuicios con persistencia y mercadeo adecuado.

2.4.3 *Reúso Potable Indirecto*

Cuando se considera el reúso potable indirecto como alternativa para el abastecimiento deben establecerse las diferencias críticas entre el reúso potable directo e indirecto. Un pequeño pero creciente número de poblaciones está planeando e implementando proyectos de reúso potable indirecto para incrementar las fuentes superficiales de agua con la aplicación de tecnologías avanzadas antes de la mezcla en el cauce o el embalse. La mezcla de agua pasa por procesos naturales ambientales que mejoran su calidad previa a ser tomada para consumo. En este tipo de proyectos el agua regenerada es tratada dos veces antes de su uso para propósitos potables, primero es tratada antes de la descarga a cuerpos superficiales, seguida por mezclado y homogenización con el agua nativa para después ser nuevamente tratada previo a la distribución en los sistemas de agua potable.

Existe además el *reúso potable incidental* (reúso potable indirecto no planeado) pues es común que las poblaciones que se abastecen de fuentes superficiales que aguas arriba están sujetas a un número significativo de descargas de agua residual tratada. Las descargas de agua residual tratada, reguladas o no, pueden incluir grandes volúmenes de agua de riego agrícola, retornos agrícolas, escurrimientos por tormentas y desbordamientos ocasionando variaciones de calidad. Aunque muchos sistemas de agua que usan fuentes superficiales cumplen con las normas para agua potable, muchas de las consideraciones para el reúso potable también deben aplicarse a estos sistemas convencionales de abastecimiento.

2.4.4 *Estudios de caso sobre el reúso potable directo*

⊕ *San Diego, California.*

En el 2006 la Ciudad de San Diego importaba hasta el 90% del agua potable para abastecimiento del Río Colorado y del Proyecto de Agua del Estado de California. La ciudad reconoció la necesidad de desarrollar fuentes locales de agua para reducir esta dependencia [City of San Diego, 2006]. En 1993 se propuso por primera vez el Proyecto de Repurificación de San Diego siendo un proyecto sencillo, con una relación costo/beneficio atractiva. A pesar de que el proyecto fue promocionado como un recurso valioso y el reciclaje era la alternativa adecuada fue cancelado por el consejo de la ciudad en 1998. Sin embargo, este primer intento es punto de referencia para la evaluación de proyectos de reúso potable indirecto para incrementar la disponibilidad de agua superficial.

En 2005 el Departamento de Agua de la ciudad llevó a cabo un estudio para evaluar las oportunidades de incrementar la producción y el uso del agua regenerada. Como resultado de este estudio se formuló un proyecto alternativo de reúso no potable, el Proyecto de Reúso Benéfico que se implementó en la Actualización del Plan Maestro de Agua Regenerada y en numerosos planes y sistemas de mejoras para el uso no potable de agua recuperada, a través del aumento de las fuentes superficiales. El estudio de reúso de agua evalúa las ventajas, limitaciones y valor de diferentes distintas alternativas del reúso de agua factibles a la ciudad de San Diego, sin embargo, no proporciona recomendaciones de proyectos específicos.

Como parte del aprendizaje en este caso, cualquier proyecto de reúso indirecto debe atender los siguientes puntos críticos: (1) actividades de divulgación y participación pública y (2) el enfoque principal debe ser la salud y seguridad en el reúso del agua. Otros factores importantes son la evaluación del beneficio/costo y aspectos ambientales.

⊕ *Singapur.*

El reúso de agua siempre ha sido un componente importante en el abastecimiento de Singapur, iniciando por el proyecto de Aguas Industriales de Jurong en la década de 1970, que abastecía a la industria del suroeste de la isla con agua de tratamiento terciario. Desde 1999 el gobierno de Singapur, por medio de la Junta de

Servicios Públicos (JSP), desarrollo un sistema avanzado de tratamiento conocido como *Fábrica de Agua Nueva* (NEWater Factories).

Al lanzar la iniciativa se propuso el desarrollo de fuentes alternativas y renovables de agua, en un esfuerzo por garantizar la sustentabilidad del abastecimiento y la consecuente calidad del agua. La iniciativa es conocida localmente como Estrategia de Cuatro Pasos y consiste en: (1) Recolección y tratamiento de agua de lluvia, (2) Importar agua de Malasia, (3) Reúso de agua, y (4) Desalación de agua de mar. La pieza central de esta estrategia es la operación de la *Fábrica de Agua Nueva*. El proceso central de la planta es un sistema de membranas consistente en microfiltración (MF), ósmosis inversa (OI) y desinfección ultravioleta (UV).

El agua regenerada es empleada como suministro en la manufactura de semiconductores y aumentar las reservas de agua potable [Law, 2003; Giap, 2005; Singh, 2005]. La introducción de agua en el embalse para el reúso potable indirecto implica una mezcla con el agua nativa sujeta a procesos naturales de tratamiento antes de ser potabilizada. La JSP introdujo en 2003 150 lps de “agua nueva” al embalse, cerca del uno por ciento del consumo diario, en 2011 llegó al dos por ciento del consumo total. El objetivo es obtener 25% del abastecimiento de estas fuentes no tradicionales: 15% de “agua nueva”, 5% de agua desalada y el 5% restante de agua industrial.

El lanzamiento oficial de “agua nueva” fue en 2002 y se entregaron 60 mil botellas de NEWater de forma simbólica; hoy más de un millón de botellas de NEWater son distribuidas al público para propósitos educativos y han sido bien recibidas por los usuarios.

El éxito de este proyecto reside en la labor intensiva de la JSP en un programa educativo sobre el “agua nueva”, que se complementa con la publicación de advertencias, posters, folletos, y diversas campañas de difusión. Sobresale el Centro de Visitantes NEWater, inaugurado en 2003, en el que se muestra al público el funcionamiento de los procesos de membranas y desinfección.

✦ *Scottsdale, Arizona.*

El *Proyecto del Campus de Agua de Scottsdale*, que recarga el acuífero con agua reciclada, fue diseñado para incrementar la capacidad de tratamiento del agua residual, lograr un rendimiento seguro y acercar a Arizona al código de Gestión de Acuíferos. Este proyecto fue exitoso por muchas razones, la comunidad apoya la idea de aprovechar el agua para recargar el acuífero local.

Las alternativas fueron discutidas a fondo por las autoridades de la ciudad y el comité asesor técnico de entidades académicas, de regulación, de salud pública y representantes de tecnología. La alternativa más importante era invertir en nueva infraestructura, adquirir más capacidad de tratamiento de aguas residuales en la planta de tratamiento y adquirir más derechos para aguas superficiales (del centro de Arizona o del proyecto Salt River) para recargar el acuífero. Los comunicados del proyecto constantemente comparaban el reúso indirecto potable como la alternativa más atractiva, usando textos simples y gráficos describieron por que el reúso potable indirecto era la mejor opción [WEF & AWWA, 2008].

El Campus de Agua es tiene una capacidad de 20 millones de galones por día, se compone de un tratamiento avanzado, microfiltración y ósmosis inversa, la recarga se hace por medio de pozos en la zona no saturada y cuenta además con pozos para recarga de emergencia en la zona vadosa. El concepto visionario del Campus del Agua está permitiendo a Scottsdale a asegurar el suministro de agua a largo plazo.

2.5 Planeación del reúso potable y criterios para seleccionar alternativas

El reúso potable es una aplicación controversial del reúso, la planeación debe hacerse con mucho cuidado. Asegurar la calidad adecuada del agua para suministro y proteger las fuentes superficiales de agua es

imperativo en cualquier proyecto de reúso potable. Deben conocerse las condiciones del agua residual tratada y los requerimientos para la distribución o la mezcla con fuentes naturales. Es necesario identificar si existe influencia de alguna otra descarga de agua residual y los puntos de posible contaminación urbana y agrícola.

La Tabla 3 muestra algunos factores importantes que influyen en la ponderación del reúso potable. En la planeación de proyectos de reúso potable deben ser evaluados: (1) características de la cuenca, (2) caudal necesario de agua regenerada, (3) requisitos de tratamiento, (4) capacidades tecnológicas, (5) aspectos institucionales, (6) costos y (7) aceptación pública.

Tabla 3. Ejemplos de barreras, riesgos a discutir y alternativas de manejo de riesgos.

Barrera	Riesgos a discutir	Enfoque típico de manejo de riesgos
Protección de la fuente	Agentes patógenos Contaminantes químicos Radiactivos	Plan de protección de cuenca Actualización del tratamiento de agua residual Alternativa de fuente de agua
Tratamiento	Agentes patógenos Desinfección Contaminantes químicos	Normas de calidad del agua Filtración química Desinfección
Sistema de distribución	Infiltración Regeneración de patógenos	Cloro residual Sistema presurizado Plan de mantenimiento
Reducción natural (dilución, decrecimiento y descomposición)	Contaminantes traza y no regulados	Atenuación natural y dilución en el cuerpo de agua Almacenamiento en un embalse
Monitoreo	Fallos no detectados del sistema	Monitoreo automático Alarmas y válvulas de emergencia Bitácora, análisis de tendencias
Reacción ante condiciones adversas	No actuar con prontitud en caso de falla del sistema Falta de comunicación inmediata con las autoridades de salud y el público	Planes de respuesta a emergencias Advertencias o indicaciones de hervir el agua

Fuente: Metcalf & Eddy, 2007.

Como recomendación general para favorecer la aceptación de los proyectos de reúso potable indirecto es mejor no proponer el reúso como solución al problema de disposición final del agua residual, pues para el usuario significa: pedirle que beba agua reciclada para solucionar el problema disposición de aguas residuales. El reúso potable indirecto debe proponerse como una nueva y mejor fuente de abastecimiento de agua, que garantiza seguridad y confiabilidad.

- *Características de la cuenca*

Antes de ejecutar un proyecto de reúso indirecto potable deben evaluarse las características de la cuenca para establecer una condición base que pueda ser usada para determinar los efectos a largo plazo en la calidad del agua. Es imperativo monitorear los parámetros microbiológicos, orgánicos e inorgánicos determinar las condiciones básicas con programas de monitoreo diseñados para considerar las variaciones en el ciclo hidrológico, natural e inducido, que puedan ocurrir [WEF & AWWA, 1998]. La correcta identificación y cuantificación de fuentes no puntuales de contaminación fecal es muy importante para la consideración de la cuenca para el reúso potable indirecto [Thompson *et al.*, 2006].

- *Caudal necesario de agua regenerada*

El volumen de agua reciclada para incrementar el abastecimiento es un aspecto fundamental en la planeación de los sistemas de reúso potable indirecto. La cantidad de agua introducida que recibirá el río, embalse o

acuífero en relación con el agua nativa, representa la facción que deberá ser considerada en la planeación y comunicación con el público y las agencias de regulación.

Dependiendo del comportamiento del cuerpo receptor, en relación con su variabilidad estacional y la disminución de las reservas naturales, puede formularse una condición extrema que posiblemente requiera de modificaciones estructurales u operativas para permitir el manejo apropiado del agua reciclada.

- *Riesgos de salud pública: requisitos de tratamiento*

Las preocupaciones sobre los riesgos a la salud en el reúso potable indirecto están relacionadas principalmente con la presencia potencial de patógenos y contaminantes emergentes en el agua regenerada, compuestos orgánicos de origen antropogénico. Los avances recientes en las técnicas analíticas de medición de constituyentes traza, orgánicos e inorgánicos, han superado la base de conocimientos de los impactos de estos componentes en la salud.

Las plantas de tratamiento convencionales incluyen procesos de tratamiento como coagulación química, floculación, sedimentación, filtración y desinfección. Sin embargo, los procesos de tratamiento y de potabilización convencionales no remueven la mayoría de los contaminantes emergentes que pueden encontrarse en las aguas residuales municipales. Por ejemplo, el agua residual puede contener componentes orgánicos que habitualmente no se considera un riesgo en sí mismo para la salud, sin embargo sólo son parcialmente removidos por los tratamientos convencionales y reaccionan con el cloro dando lugar a carcinógenos, además de ciertos microorganismos que tampoco son eliminados de manera eficiente.

Debido a la importancia de la percepción pública respecto a estas preocupaciones de salud, deben tomarse en consideración: (1) la selección y uso de las tecnologías apropiadas en el tratamiento para la remoción de patógenos y contaminantes emergentes, (2) la confiabilidad del sistema y (3) sistemas de barreras múltiples.

- *Capacidades Tecnológicas*

El reúso potable implica la dependencia y confianza en la tecnología aplicada para siempre producir agua segura y aceptable para consumo. Los tratamientos avanzados como microfiltración, ultrafiltración, ósmosis inversa y oxidación avanzada, son empleados comúnmente para el tratamiento de patógenos y contaminantes emergentes y han garantizado niveles de concentración para estos contaminantes por debajo de los límites de detección.

La preocupación habitual es si las plantas de tratamiento cuentan con la tecnología adecuada para producir agua reciclada segura de manera constante para el reúso potable, de modo que no sea un riesgo más para la salud. Es deseable contar con un sistema confiable que funcione adecuadamente en un periodo específico bajo condiciones específicas; éste depende de la variabilidad de las características del agua residual, de los procesos de tratamiento (biológicos y avanzados), del funcionamiento mecánico y de un monitoreo efectivo. El esquema de barreras múltiples se usa para asegurar la seguridad del agua reciclada y se basa en la redundancia con modos independientes de falla.

No hay limitantes tecnológicas para el mejoramiento de la calidad del agua, sin embargo, en el caso reúso potable directo se ha argumentado que sería prudente esperar hasta que se conozca más sobre los efectos en la salud de muchos contaminantes emergentes que pueden encontrarse en el agua regenerada.

- *Aspectos institucionales*

Los aspectos institucionales que deben tenerse en cuenta en la planeación de un proyecto de reúso potable indirecto incluyen las normas de calidad, derechos de agua y otros. Las leyes, normas y reglamentos a nivel

estatal y federal representan un desafío para la implementación de un proyecto de reúso potable indirecto. Los derechos de agua pueden ser una limitante para el agua reciclada y los proyectos de reúso por la imposición de restricciones y requerimientos en el reúso del agua.

- *Costos*

Una parte importante del gasto para el agua regenerada y el reúso en áreas urbanas tiene que ver con construir líneas y sistemas de almacenamiento especiales. En muchos casos los costos por duplicar el sistema de distribución hacen poco factible el proyecto, limitando la implementación de este tipo de proyectos. La falta de infraestructura para el reúso no potable puede ser muy costosa de implementar, particularmente en áreas urbanas [EPA, 2004]. El reúso potable brinda la oportunidad de reducir significativamente el costo de distribución del agua reciclada pues la infraestructura es la que ya se usa para suministrar agua a los usuarios.

En muchos casos el reúso potable es la mejor alternativa para el uso benéfico de los recursos naturales, pero la implementación del proyecto depende de un costo viable. Los aspectos que pueden afectar la factibilidad financiera de los proyectos de reúso potable son principalmente las metas de calidad del agua o las normas a cumplir (tratamiento), los costos de las alternativas (infraestructura), el método de financiamiento y la recuperación de los costos de operación y mantenimiento (O&M).

El análisis de beneficio/costo debe incluir aquellos factores indirectos que influyan de alguna manera en el proyecto para realizar comparación justa contra otra alternativa. En ese tenor debe ser evaluado el valor del agua y su disponibilidad contra el costo de su uso, es decir, el costo de oportunidad. Otra ventaja significativa para el reúso potable directo e indirecto, es que puede hacerse con el agua reciclada disponible, por tanto puede argumentarse que el reúso potable puede ser usado para maximizar la cantidad de agua reusada, comparado con el riego agrícola y otras aplicaciones intermitentes del reúso.

- *Aceptación pública*

El éxito de cualquier proyecto de reúso es determinado por el nivel de aceptación pública. Obtener la aceptación pública requiere de un proyecto bien estructurado, con participación social, información y educación. Es fundamental que el público esté educado acerca de la calidad del agua potable y de los principios y capacidades del agua reciclada, así como de las tecnologías y aplicaciones del reúso. Un componente esencial es informar a la sociedad de la necesidad de incorporar el reúso potable en el plan de abastecimiento de agua. Una sociedad educada y bien informada reconocerá la necesidad de la integración en el manejo de los recursos regionales e incrementa la probabilidad de confianza en el proyecto.

El reúso potable debe compararse con otras alternativas, los pros y contras de cada una deben comunicarse con claridad ya que si alguna alternativa no forma parte de los comunicados los opositores pueden afirmar que se está siendo tendencial con un proyecto en particular y no con resolver el problema o asegurar el suministro de agua. En suma una sociedad informada es esencial para la aceptación exitosa de los proyectos de reúso potable.

Indudablemente el reúso potable directo es la situación más difícil para la aceptación de la comunidad entre la categoría de aplicaciones de reúso de agua. Existe una resistencia natural a consumir el agua que alguna vez contuvo excreta humana, independientemente de la intensidad del proceso de tratamiento y purificación posterior a la que el agua regenerada es sometida. La renuencia de aceptar el agua reciclada para propósitos potables es de esperarse, particularmente cuando la percepción entre los usuarios finales es que no hay dilución, purificación natural, o pérdida de identidad antes de que el agua regenerada sea consumida otra vez.

A pesar de que algunas propuestas cumplan con un alto perfil, los proyectos de reúso potable indirecto no han sido aceptados en años recientes por oposición pública o política referentes a cuestiones de salud pública,

justicia ambiental o crecimiento. La experiencia reciente en San Diego, California (2006), es que con la educación apropiada y sensibilización del público se logra un apoyo para el reúso potable indirecto. Es probable que este uso aumente en un futuro.

Para la selección de fuentes posibles, incluyendo proyectos de reúso potable, se requiere considerar no sólo la cantidad de agua disponible, sino la calidad, normatividad, capacidades tecnológicas y costos para dotar a la población de una fuente segura, confiable y a precios acordes con el valor económico y social del agua, lo que nos lleva a un nuevo enfoque de disponibilidad.

2.6 Un nuevo enfoque de disponibilidad

El reúso de agua se constituye como una alternativa con un alto volumen aprovechable a nivel mundial. Las alternativas de reúso no potable son muy variadas aunque requieren de un manejo del agua dedicado a centros de demanda intensiva con bajos niveles de calidad o baja vulnerabilidad a variaciones en la calidad del agua. Por el contrario, el reúso potable requiere de un manejo de barreras múltiples que garanticen que la calidad del agua siempre será potable, por ejemplo pasar el agua reciclada por el medio natural antes de ser reutilizada.

Para lograr un intercambio de agua tratada por agua de pozos en la agricultura, ejemplo de reúso no potable, es necesario concretar proyectos de tratamiento, regulación y distribución de agua tratada hacia las zonas agrícolas regadas actualmente con pozos. Desafortunadamente la legislación actual no es suficiente para incentivar la generalización del intercambio de derechos de primero y segundo uso para agua subterránea ni superficial.

El reúso potable indirecto puede incrementar y mejorar el suministro de agua potable y trae consigo los siguientes beneficios:

- *Crea una nueva fuente de agua con alta calidad* favoreciendo los recursos locales y las inversiones realizadas en el pasado para purificar el agua. Evita la necesidad de algunas regiones de importar agua de cientos de kilómetros para un solo uso.
- *Ayuda a incrementar la resistencia a la sequía* debida a las variaciones estacionales del clima y otros factores sin necesidad de construir infraestructura costosa, como almacenamientos superficiales. Permite a las localidades tener la capacidad de brindar un servicio seguro de agua durante las sequías, algo crítico para mantener la economía local y la calidad de vida.
- *Maximiza el valor de los almacenamientos de agua.* El reúso potable directo devuelve el agua a los almacenamientos superficiales o subterráneos para restaurarlos incluso durante las sequías. Muchas comunidades actualmente disponen del agua residual tratada aun cuando las reservas están por debajo de los niveles óptimos.
- *Mejora la calidad del agua.* El tratamiento intensivo y los protocolos de pruebas producen un agua de calidad superior a la encontrada de manera natural en las fuentes de abastecimiento. Los proyectos de reúso potable indirecto llevan el agua a estándares de calidad extremadamente altos, esto implica el empleo de múltiples procesos de purificación y pruebas de calidad rigurosas.
- *Es financieramente atractivo.* Los proyectos de reúso potable indirecto aprovechan las inversiones hechas para transporte y purificación del agua, puede eliminar o retrasar la necesidad de construir nueva infraestructura de abastecimiento. Además evita el costo de nueva infraestructura de reúso (líneas moradas) ya que el agua es entregada por el sistema existente de agua potable. A pesar de que los costos de tratamiento y aseguramiento de la calidad son mayores, con el reúso indirecto potable el agua carece de restricciones de uso, devolviéndole todas las propiedades de valor y aumentando efectivamente la disponibilidad del recurso en la cuenca.

A pesar de estos beneficios, existen algunas cuestiones importantes a considerar para proponer un proyecto de reúso potable indirecto [WEF & AWWA, 2008]. El principal obstáculo es el manejo del territorio para regresar el agua tratada al medio natural para que a su vez los usuarios la identifiquen como agua nueva, segura y valiosa.

2.7 Cambios en la regulación

Los cambios en la regulación del reúso de agua son inevitables con el incremento del reúso y el desarrollo de más información sobre los impactos en la salud de los elementos traza y contaminantes emergentes. Las normas federales deben renovarse y estimular la implementación de más proyectos de reúso. A continuación se presentan algunos aspectos a considerar para la planeación y el diseño de la nueva legislación:

- Los proyectos de reúso deberán estar fundamentados en procesos de tratamiento seguros y sistemas de barreras múltiples.
- El nivel de tratamiento siempre depende de diversos factores como: tipo de proyecto, aspectos de salud, calidad del agua, etc.
- Es necesario establecer programas permanentes de monitoreo de calidad del agua y cumplimiento de las normas.
- La aceptación pública del reúso puede depender, en parte, de contar con regulaciones adecuadas.

En México, por ejemplo, existen ciertos requerimientos para ordenar el reúso no potable como: (1) la correcta aplicación de la legislación existente, (2) ejecución del marco metodológico para reúso en la agricultura sin riesgos al suelo, acuíferos, cultivos y salud pública en zonas de nuevo aprovechamiento, y (3) la realización de estudios epidemiológicos integrales relacionados con el reúso del agua residual en zonas ya establecidas de riego con agua residual tratada o cruda.

Complementar las acciones anteriores con una mayor inversión en infraestructura de tratamiento y distribución llevará a un mejor control del manejo de las aguas residuales con la consecuente disminución de la contaminación y la degradación ambiental.

3.0 METODOLOGÍA

3.1 Estudios de calidad del agua en el Valle del Mezquital

En 1962 se realizó el primer estudio de análisis químico del agua del Valle del Mezquital buscando agua subterránea contaminada por agua superficial, los resultados sitúan a la región con las más altas concentraciones de nitratos y cloruros por encima de las concentraciones normales para agua potable. Los pozos profundos se mantuvieron con buena calidad.

Estudios posteriores (del Arenal, 1985) muestran a las aguas subterráneas principalmente con contenidos de bicarbonato de sodio clasificándolas en tres tipos. En el primer grupo predomina el litio con concentraciones de 0,2 a 2,1 mg/L (las más bajas en Ixmiquilpan y las más altas al sur de Ajacuba), la presencia de este elemento se asoció con la actividad geotermal en Ajacuba. El segundo grupo es el área de Tepeji del Río con bajos sulfatos, este grupo se representa por agua derivada de la recarga por lluvia. El tercero y más grande abarca los pozos artesianos, pozos profundos y manantiales en el acuífero aluvial, en este se presentan composición similar a las muestras superficiales provenientes de las descargas de aguas residuales, por lo que se concluyó que están directamente relacionadas con este origen.

Un gran número de localidades se abastecen actualmente por pozos, manantiales y norias distribuidos en el valle, con cloración como único tratamiento; en los últimos quince años diversas instituciones académicas y privadas se han interesado en determinar los valores de concentración de contaminantes tomando como estándares de calidad la *NOM 127* (norma para abastecimiento de agua potable en México) y algunos internacionales como la Comunidad Económica Europea (CE), la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Agencia de Protección al Ambiente (EPA por sus siglas en inglés) y otros.

La Tabla 4 muestra los parámetros regulados por la *NOM 127 SSA1-1994 Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización*. En la Tabla 5 se observan los límites para una selección de parámetros en las siguientes normas: *NOM 127*, *EPA 2009*, *OMS 2008*, *UE 1998* y *PROY-NOM-SSA1-250-2007 Agua para uso y consumo humano. Límites máximos permisibles de la calidad del agua, control y vigilancia de los sistemas de abastecimiento*.

Tabla 4. Parámetros regulados por la *NOM 127 SSA1 1994*

Grupo	Parámetro
Microbiológicos (2)	Organismos Coliformes Totales, Organismos Coliformes Fecales como E. Coli u Organismos Termotolerantes
Organolépticos (3)	Color, Olor y Sabor
Físicoquímicos (3)	pH, Sólidos Disueltos Totales, Turbiedad
Inorgánicos (21)	Aluminio, Arsénico, Bario, Cadmio, Cianuros (como CN ⁻), Cloro residual libre, Cloruros (como Cl ⁻), Cobre, Cromo total, Fierro, Fluoruros (como F ⁻), Manganeseo, Mercurio, Nitratos (como N), Nitritos (como N), Nitrógeno amoniacal (como N), Plomo, Sodio, Sulfatos (como SO ₄ ⁻), Yodo libre residual, Zinc
Orgánicos (9)	Acrilamida, Benceno, Dureza total (como CaCO ₃), Etilbenceno, Fenoles o compuestos fenólicos, Hexaclorobenceno, Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM), Tolueno, Xileno (tres isómeros),
Plaguicidas (10)	2,4-D, Aldrín y dieldrín, Clordano (total de isómeros), DDT (total de isómeros), Heptacloro y epóxido de heptacloro, Lindano, Metoxicloro, Trihalometanos totales
Radiactivos (2)	Radiactividad alfa y beta global

La orientación común de los estudios revisados fue determinar parámetros microbiológicos básicos como los coliformes fecales (siempre detectables) o algún otro microorganismo (presente en algunos casos y

documentos puntuales). Respecto de los parámetros físico-químicos, se encontraron principalmente pH, sólidos disueltos totales, SDT, sodio, conductividad, nitratos y sulfatos. En algunos de los estudios consultados se reportan datos para una selección de metales pesados, sin resultados determinantes.

En la Figura 7 se muestran los sitios analizados, obtenidos de los diferentes inventarios elaborados para los estudios anteriores.

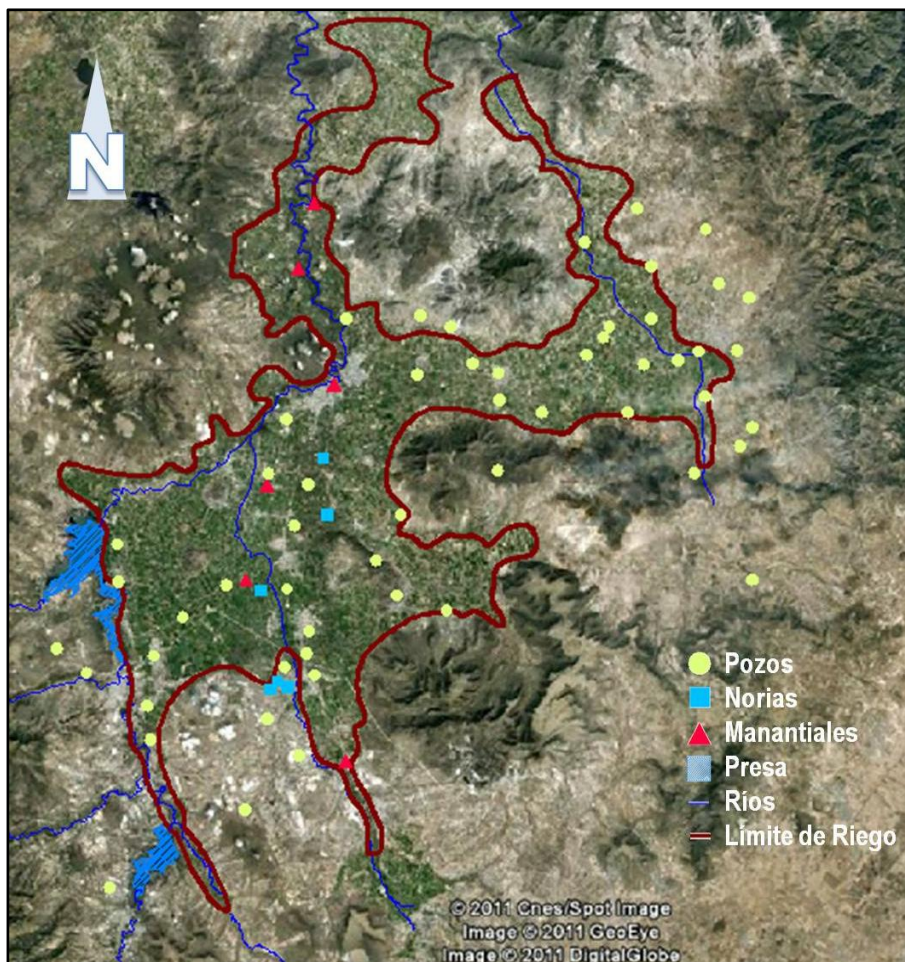


Figura 7. Algunas fuentes de abastecimiento del Valle del Mezquital

El BGS en 1996 hizo un levantamiento de 380 fuentes de agua (289 pozos, 66 norias, 22 manantiales y 3 galerías filtrantes), en 1997 Jiménez *et al.* verificaron la existencia de dichas fuentes encontrando sólo 128 (102 pozos, 12 norias y 14 manantiales). En contraste, la Comisión Nacional del Agua, CONAGUA, en 2002 estableció que en total hay 179 pozos registrados, los cuales se concentran en los municipios de Tula (69), Atotonilco (27) y Tlaxcoapan (25) y reporta la existencia de 16 manantiales. En algunos de los estudios no se especifican las características de algunos sitios que se consideraron como pozos y en otros como galerías filtrantes o manantiales.

Dada la aparente discrepancia en el número y tipo de fuentes se considera necesaria una actualización del inventario de fuentes de suministro municipal y agrícola con geoposicionamiento estandarizado, profundidad de ademe, perforación y bombeo, diámetro de la tubería, nivel estático, nivel dinámico, gasto, tipo de uso, población y comunidades abastecidas (dado el caso); de igual forma los canales de riego y la proximidad entre ambos.

3.1.1 Evaluación de la calidad del agua

Los acuíferos del Valle del Mezquital no cumplen con la mayoría de los estándares recomendados de acuerdo con el análisis comparativo entre los resultados de los sitios muestreados y las normas NOM-127-SSA1-1994, OMS 2008, EPA 2009 y Directiva 98/83/CE. En el centro del valle se tienen concentraciones elevadas de SDT (más de 1200 mg/L), lo que puede ser indicativo de una alta influencia del agua residual en la recarga del acuífero.

En este ejercicio se consideró que el aprovechamiento del acuífero será mediante un sistema de extracción por medio de perforaciones profundas y su posterior tratamiento para el consumo urbano – doméstico, por ello únicamente se analizan las condiciones de calidad del agua de los pozos para determinar en cada caso los niveles de contaminación y las familias de contaminantes que deberán ser considerados en el diseño de los procesos de potabilización. El Anexo A contiene los valores reportados de calidad del agua en pozos por las distintas fuentes consultadas con datos entre 1994 y 2009.

3.1.2 Análisis de la información

Con la información recopilada formulé una base de datos que permitiera comparar los resultados de los diferentes estudios, los grupos de contaminantes propuestos son: microbiológicos, físico-químicos, inorgánicos, subproductos de la desinfección, contaminantes emergentes y radiactivos.

En la Tabla 5 se muestran los valores de calidad promedio del agua de los 60 pozos muestreados de los acuíferos del Valle del Mezquital en diversos estudios entre 1994 y 2009, se indica el número de datos, el valor máximo y el promedio, los límites permisibles por las normas seleccionadas, incluyendo el proyecto de norma: PROY-NOM-SSA1-250-2007 y el porcentaje de remoción mínimo para el cumplimiento de la normatividad nacional. A continuación se presenta el análisis datos para los pozos muestreados.

⊕ Microbiológicos

La orientación común de los documentos compilados fue determinar parámetros microbiológicos básicos como los coliformes fecales, sin embargo esto no es suficiente para valorar el impacto ambiental y sobre la salud pública, se requiere analizar otros parámetros que coadyuvan a evaluar la incidencia de enfermedades gastrointestinales y otras relacionadas con el consumo del agua de los acuíferos del Valle del Mezquital. Se han analizado 42 pozos y todos exceden el contenido de coliformes totales y fecales (la norma es cero) con valores que oscilan entre 1 y 28 500 NMP/100mL.

⊕ Físico-químicos

La concentración de sólidos disueltos totales excede, en 90% de los casos, el valor de 1000 mg/L establecido por la NOM 127. El promedio calculado es de 1237 mg/L.

En cuanto a otros parámetros se encontraron principalmente, sodio, conductividad, nitratos y sulfatos. En algunos de los estudios consultados se reportan datos para una selección de metales pesados (elementos traza); el aluminio, plomo, cadmio, cromo y boro son elementos que en la mayoría de las fuentes monitoreadas sobrepasan los límites establecidos por las normas y criterios considerados.

⊕ Inorgánicos

Existen problemas por sulfatos, sodio y cloruros en algunos pozos. La dureza total promedio expresada como CaCO₃, Carbonato de Calcio, es de 323 mg/L, solamente 4 sitios superaron la norma. Por estos valores el agua de los acuíferos del Valle del Mezquital puede catalogarse como agua dura y las principales repercusiones pueden experimentarse como incrustaciones en las tuberías además de que representan un daño potencial para los sistemas de tratamiento con membranas.

⊕ *Subproductos de la desinfección*

La Materia Orgánica Natural (MON) es una mezcla de materiales orgánicos que habitualmente no se considera un riesgo en sí mismo para la salud; usualmente se mide como Carbón Orgánico Disuelto⁶ (COD) y reacciona con el cloro dando lugar a la formación de diversos compuestos conocidos como sub-productos de la desinfección, muchos de ellos carcinogénicos (principalmente bromatos, cloratos y trihalometanos). Sólo se reportó COD para un pozo y su valor es de 4,2 mg/L.

Solamente en tres pozos se han analizado sub-productos de la desinfección: San Salvador, 9 Teocalco y Tezontepec. En estos pozos se detectó la presencia de: 2,4,6-triclorofenol, bromoformo, cloroformo, dibromoclorometano y trihalometanos totales. En la norma mexicana no se consideran valores límite para los cuatro primeros subproductos de la desinfección, sin embargo, su presencia implica riesgos para la salud. El 2,4,6-triclorofenol, el bromoformo y el dibromoclorometano causan enfermedades en hígado, riñones y sistema nervioso, además que favorecen el desarrollo de cáncer [Jiménez *et al.*, 2008].

⊕ *Contaminantes Emergentes*

Los "contaminantes emergentes" (o micro-contaminantes) corresponden a compuestos orgánicos de origen antropogénico. La regulación de estos contaminantes es escasa, debido al desconocimiento de sus efectos, además de que no se tiene un inventario de "todas" las especies químicas presentes en una muestra ambiental, por limitaciones analíticas [Becerril, 2009]. Entre los compuestos recientemente catalogados en este grupo se encuentran los surfactantes, los productos farmacéuticos, los productos de aseo y cuidado personal y los aditivos de la gasolina. Para la mayoría de estos compuestos los datos sobre los efectos de salud son aún escasos.

En el agua de los pozos del Valle del Mezquital destaca la carbamazepina, considerado compuesto un indicador de contaminación orgánica. Se detectaron sólo en algunos pozos bisfenol-A, naproxeno, ibuprofeno, ácido salicílico, triclosan, di2etilxilftalato (DEHF), butilbencilftalato (BuBeF) y nonilfenol, otros están por debajo del límite de detección. Todos se encontraron por debajo de los criterios existentes para agua potable (OMS 2008, NOM 127, EPA 2009) y de los límites provisionales existentes (Webb 2001, Kümmerer, 2004, Cleuvers 2003, Schulman *et al.* 2002).

⊕ *Radiactivos*

No se detectan elementos radiactivos (Alfa y Beta) que rebasen los límites permisibles por la NOM 127; en algunos de los pozos se cuenta con información sobre el Uranio para el cual no contempla límites en la norma mexicana, en tanto que la EPA 2009 establece un valor de 0.03 mg/L (30µg/L) y la OMS 2008 de 0.015 mg/L (15µg/L). Considerando estos límites, algunos pozos representan un riesgo [Jiménez *et al.*, 2008].

⁶ No hay límites establecidos para la materia orgánica total en las normas mexicanas y sólo el proyecto de norma PROY-NOM-250-2007 establece un valor límite para el COD de 0.01 mg/L.

Tabla 5. Calidad promedio del agua de pozo de los acuíferos del Valle del Mezquital

Parámetros	Unidad	60 Pozos analizados			Límite permisible					Remoción mínima	
		Datos	Media	Desvest	NOM 127 1994	EPA 2009	OM 2008	UE 1998	PROYNOM250 2007	NOM 127	PROY NOM 250
2,4,D	µg/L	8	0,00	0,00	30,00	70,00	30,00	-	30,00	0,00%	0,00%
Acidez	mg/L	30	34,50	22,46	-	-	-	-	-	NA	NA
Alcalinidad Total	mg/L	7	522,14	28,28	-	-	-	-	-	NA	NA
Aldrin	µg/L	8	0,00	0,00	0,03	-	0,03	0,03	0,30	0,00%	0,00%
Aluminio	mg/L	41	5,27	8,94	0,20	0,05 – 0,20	0,20	0,20	0,20	96,21%	96,21%
Antimonio	mg/L	34	0,28	0,75						100,00%	100,00%
Arsénico	mg/L	10	0,00	0,00	0,025	0,01	0,01	0,001	0,01	0,00%	0,00%
Bario	mg/L	44	0,30	0,59	0,70	2,00	0,70	-	0,70	0,00%	0,00%
Berilio	mg/L	34	0,13	0,07	-	0,004	-	-	-	NA	NA
Benceno	µg/L	8	0,00	0,00	10,00	5,00	10,00	1,00	10,00	0,00%	0,00%
Bicarbonatos	mg/L	7	519,14	51,02	-	-	-	-	-	NA	NA
Boro	mg/L	39	0,49	0,45	-	-	0,50	1,00	0,50	NA	0,00%
Bromoformo	mg/L	1	0,03	NO	-	-	0,10	-	0,10	NA	0,00%
Cadmio	mg/L	39	3,48	20,30	0,005	0,005	0,003	0,005	0,003	99,86%	99,91%
Calcio	mg/L	36	87,85	76,05	-	-	-	-	-	NA	NA
Carbonatos	mg/L	4	44,25	29,68	-	-	-	-	-	NA	NA
Carbono orgánico disuelto	mg/L	1	4,18	NO	-	-	-	-	0,01	NA	99,76%
Carbono orgánico total	mg/L	3	19,10	8,64	-	-	-	-	0,20	NA	98,95%
Cianuros (CN ⁻)	mg/L	11	0,01	0,01	0,07	0,20	0,70	-	0,07	0,00%	0,00%
Clordano	µg/L	8	0,00	0,00	0,20	0,20	0,20	-	0,20	0,00%	0,00%
Cloro Libre	mg/L	8	0,31	0,68	0,20-1,50	-	-	-	0,20-1,50	OK	OK
Cloroformo	mg/L	0	S/D	S/D	-	-	0,30	-	0,20	S/D	S/D
Cloruros (Cl ⁻)	mg/L	44	164,89	105,76	250,00	250,00	-	250,00	-	0,00%	NA
Cobalto	mg/L	39	0,30	0,71	-	-	-	-	-	NA	NA
Cobre	mg/L	44	4,17	3,10	2,00	1,30	2,00	2,00	2,00	52,07%	52,07%
Coliformes fecales	(NMP/100mL)	47	88,20	373,14	Ausencia	5%	Ausencia	0,00	Ausencia	100,00%	100,00%
Coliformes totales	(NMP/100mL)	49	1 307,58	4704,35	Ausencia	5%	Ausencia	0,00	Ausencia ⁷	100,00%	100,00%
Color	Pt/Co	9	3,22	1,67	20,00	15,00	15,00	Aceptable	15,00	0,00%	0,00%
Conductividad	µS/cm	42	1 461,27	699,88	-	-	-	2500,00	1200,00	NA	17,88%
Cromo total	mg/L	42	2,29	2,10	0,05	0,10	0,05	0,05	0,05	97,82%	97,82%

⁷ Inferido del proyecto de norma

El reúso potable indirecto como alternativa para el abastecimiento de la Zona Metropolitana del Valle de México

Parámetros	Unidad	60 Pozos analizados			Límite permisible					Remoción mínima	
		Datos	Media	Desvest	NOM 127 1994	EPA 2009	OM 2008	UE 1998	PROYNOM250 2007	NOM 127	PROY NOM 250
DBO _{5s}	mg/L	3	3,07	0,12	-	-	-	-	-	NA	NA
DBO _{5t}	mg/L	7	10,84	6,17	-	-	-	-	-	NA	NA
DDT	µg/L	8	0,00	0,00	1,00	-	1,00	-	1,00	0,00%	0,00%
Dieldrin	µg/L	8	0,00	0,00	0,03	-	0,03	0,03	0,30	0,00%	0,00%
Dióxido de carbono (CO ₂)	mg/L	3	149,33	38,00	-	-	-	-	-	NA	NA
DQOs	mg/L	3	9,00	2,61	-	-	-	-	-	NA	NA
DQOt	mg/L	19	25,67	35,08	-	-	-	-	-	NA	NA
Dureza total (CaCO ₃)	mg/L	19	322,77	196,02	500,00	-	-	-	500,00	0,00%	0,00%
E. histolytica	mg/L	0	S/D	S/D	-	-	-	-	0/20L	S/D	S/D
Estreptococos fecales	mg/L	0	S/D	S/D	-	-	Ausencia	0,00	-	S/D	S/D
Etilbenceno	µg/L	8	0,00	0,00	300,00	700,00	300,00	-	300,00	0,00%	0,00%
Fenoles	µg/L	4	0,01	0,00	300,00	-	-	-	-	0,00%	NA
Fierro	mg/L	43	0,07	0,12	0,30	0,30	-	0,20	0,30	0,00%	0,00%
Fluoruros	mg/L	43	0,82	0,65	1,50	2,00	1,50	1,50	0,70	0,00%	15,04%
Fósforo	mg/L	6	0,95	0,86	-	-	-	-	-	NA	NA
Heptacloro	mg/L	8	0,00	0,00	0,03	0,04	-	0,03	-	0,00%	0,00%
Hexaclorobenceno	µg/L	8	0,00	0,00	1,00	1,00	-	-	-	0,00%	0,00%
Hidróxidos	mg/L	4	0,00	0,00	-	-	-	-	-	0,00%	0,00%
Huevos de Helmintos	mg/L	10	0,00	0,00	-	-	-	-	-	NA	NA
Lindano	µg/L	8	0,00	0,00	2,00	0,20	2,00	-	2,00	0,00%	0,00%
Magnesio	mg/L	39	43,76	20,55	-	-	-	-	-	NA	NA
Manganeso	mg/L	40	0,09	0,15	0,15	0,05	0,04	0,05	0,15	0,00%	0,00%
Mercurio	mg/L	7	0,00	0,00	0,001	0,002	0,006	0,001	0,001	0,00%	0,00%
Metoxicloro	µg/L	1	0,00	NO	20,00	40,00	20,00	-	20,00	0,00%	0,00%
Molibdeno	mg/L	34	3,40	2,37	-	-	0,07	-	0,07	NA	97,94%
Níquel	mg/L	36	2,16	3,74	-	-	0,07	0,02	0,02	NA	99,08%
Nitratos(N-NO ₃)	mg/L	47	26,69	55,36	10,00	10,00	50,00	50,00	10,00	62,54%	62,54%
Nitritos(N-NO ₂)	mg/L	44	0,01	0,02	1,00	1,00	3,00	0,50	0,06	0,00%	0,00%
Nitrógeno amoniacal	mg/L	40	0,72	4,01	0,50	-	-	-	-	30,91%	NA
Nitrógeno Total	mg/L	6	10,13	10,06	-	-	-	-	-	NA	NA
Oxígeno disuelto	mg/L	36	3,82	2,34	-	-	-	-	-	NA	NA
pH	pH	45	7,26	0,30	6.5-8.5	6.5-8.5	6.5-9.5	6.5-9.5	6.5-8.5	OK	OK
Plata	mg/L	3	0,00	0,00	-	0,100	-	-	-	NA	NA
Plomo	mg/L	43	0,45	0,32	0,01	0,015	0,01	0,01	0,01	97,80%	97,80%
Potasio	mg/L	36	24,78	12,21	-	-	-	-	-	NA	NA
Potencial redox	mg/L	3	- 48,73	4,37	-	-	-	-	-	NA	NA

El reúso potable indirecto como alternativa para el abastecimiento de la Zona Metropolitana del Valle de México

Parámetros	Unidad	60 Pozos analizados			Límite permisible					Remoción mínima	
		Datos	Media	Desvest	NOM 127 1994	EPA 2009	OM 2008	UE 1998	PROYNOM250 2007	NOM 127	PROY NOM 250
SAAM	mg/L	36	0,65	3,40	0,50	-	-	-	-	23,29%	NA
Salmonella (3 variedades)	mg/L	10	0,00	0,00	-	-	-	-	-	0,00%	0,00%
Selenio	mg/L	3	0,00	0,00	-	0,05	0,01	0,01	0,01	NA	0,00%
Shigella	mg/L	7	0,00	0,00	-	-	-	-	-	NA	NA
Silicio	mg/L	34	31,15	5,21	-	-	-	-	-	NA	NA
Sodio	mg/L	44	188,51	111,51	200,00	-	200,00	200,00	-	0,00%	NA
Sólidos disueltos totales	mg/L	21	1 054,94	528,32	1000,00	500,00	-	-	1000,00	5,21%	5,21%
Sólidos suspendidos totales	mg/L	11	34,70	29,07	-	-	-	-	-	NA	NA
Sólidos totales	mg/L	16	1 191,03	348,18	-	-	-	-	-	NA	NA
Sulfatos (SO ₄ ⁻)	mg/L	47	169,95	183,71	400,00	250,00	250,00	-	-	0,00%	NA
Sulfuros	mg/L	7	6,27	4,66	-	-	-	-	-	NA	NA
Talio	mg/L	34	0,14	0,49	-	0,002	-	-	-	NA	NA
Temperatura	°C	33	23,24	2,60	-	-	-	-	-	NA	NA
Tetracloroetileno	mg/L	0	S/D	S/D	-	5,00	-	-	40,00	S/D	S/D
Tolueno	mg/L	11	7,30	9,04	0,70	1,00	0,70	-	0,70	90,41%	90,41%
Toxicidad aguda	mg/L	0	S/D	S/D	-	-	-	-	-	S/D	S/D
Trihalometanos Totales	µg/L	8	0,00	0,00	0,20	0,10	0,10	-	-	0,00%	0,00%
Turbiedad	UTN	13	23,32	82,53	5,00	5,00	5,00	Aceptable	3,00	78,56%	87,13%
Vibrio Cholerae	(NMP/100mL)	8	0,00	0,00	-	-	-	-	-	0,00%	0,00%
Virus	(UFP/100mL)	4	0,00	0,00	-	-	-	-	-	0,00%	0,00%
Xileno (Tres isómeros)	mg/L	4	0,00	0,00	500,00	10000,00	500,00	-	500,00	0,00%	0,00%
Yodo	mg/L	39	0,12	0,07	0,20 - 0,50	-	-	-	0,20 - 0,50	BAJO	BAJO
Zinc	mg/L	43	5,06	6,57	5,00	-	-	-	-	1,16%	NA

Con el análisis de los estudios recopilados se puede afirmar que se ha logrado un tratamiento no planeado de las aguas residuales provenientes del valle de México, sin embargo, se desconoce el funcionamiento de los procesos de saneamiento y por tanto de los límites naturales del suelo para este tratamiento. El tratamiento que se observa guarda similitudes con el sistema de tratamiento suelo-acuífero (*Soil Aquifer Treatment, SAT*).

Algunas experiencias desarrolladas en Israel se pueden tomar como ejemplo de este tipo de prácticas. Israel comenzó a aplicar el riego con aguas residuales en forma masiva a comienzos de la década de 1970 para la producción de algodón, hoy en día, todo tipo de cultivos son irrigados con aguas residuales tratadas; el 80% de las aguas residuales tratadas de Israel son reutilizadas en la irrigación agrícola. Uno de los tipos de tratamiento más eficientes es el que se basa sistema SAT.

El proceso consiste en la recarga de un efluente de un sistema de tratamiento primario y/o secundario simulando un proceso de infiltración natural a través de la zona saturada y una porción del acuífero dedicado a la purificación y almacenamiento del efluente (Figura 8). El sistema SAT remueve eficientemente materia orgánica y nutrientes (N y P), una variedad de metales pesados, elementos tóxicos, bacterias patógenas y virus.

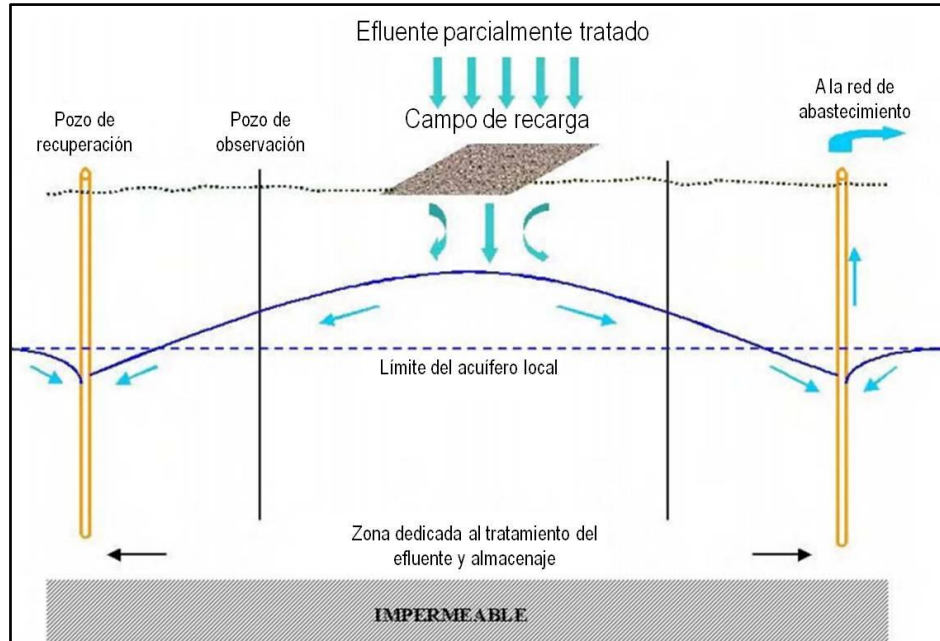


Figura 8. Esquema del Sistema de Tratamiento Suelo-Acuífero.

Durante el paso del agua a través de la zona no saturada del suelo se produce una depuración adicional debido a diversos procesos. A pesar de que en el subsuelo los organismos que coadyuvan a la autodepuración se encuentran restringidos en el subsuelo, se compensa con la purificación física a través de la filtración del material y otros fenómenos (Tabla 6).

Tabla 6. Procesos de autopurificación de las aguas subterráneas

<i>Procesos físicos</i>	<i>Procesos geoquímicos</i>	<i>Procesos bioquímicos</i>
Dispersión	Reacciones ácido-bases	Descomposición y respiración
Filtración	Reacciones de oxidación-reducción	Síntesis de material celular
Movimiento de Gases	Precipitación-Solución	

Aunque la a calidad media del agua subterránea en el Valle del Mezquital supera el límite permisible por la normatividad mexicana para agua potable, en forma generalizada mantiene estándares asequibles de

calidad, que indican su viabilidad como fuente de abastecimiento de agua potable (ver Tabla 9). Sin embargo, en comparación con la NOM 127, es necesario contar con un sistema de potabilización apropiado para disminuir los riesgos de salud a la población. Entre los indicadores de contaminación más importantes se encuentran los metales pesados y contaminantes emergentes, que ameritan una intervención especial con tratamientos avanzados.

3.2 Tratamiento vs Contaminantes

Los resultados de la caracterización del agua de los pozos, donde algunos parámetros exceden los límites establecidos en la normatividad mexicana para agua potable: NOM-127-SSA1-1994 y de algunos criterios internacionales, muestran la necesidad de tratamiento adecuado para consumo humano, por lo que se revisaron las recomendaciones para la remoción de estos contaminantes; a continuación se enlistan los parámetros que superan los límites establecidos por las normas y recomendaciones para agua de uso potable y algunos de los procesos que de acuerdo con la literatura (Metcalf & Eddy 2007, Degremont 2007) pueden eliminar o reducir estos contaminantes.

Tabla 7. Parámetros que sobrepasan el valor de la norma nacional y los criterios internacionales de agua potable en los acuíferos del Valle del Mezquital vs. Procesos de tratamiento comúnmente empleados para eliminar ciertos contaminantes.

<i>Criterio</i>	<i>Contaminantes a eliminar</i>	<i>Procesos de tratamiento recomendados</i>
MEX	Boro	Procesos de membrana / Intercambio iónico
	Cadmio	Coagulación-floculación / Precipitación / Procesos de membrana/ Intercambio iónico
	COT	Oxidación / Carbón activado / Procesos de membranas / Intercambio iónico
	Cobre	Coagulación-floculación / Intercambio iónico / Procesos de membrana
	Coliformes fecales	Desinfección (cloro / UV)
	Coliformes totales	Desinfección (cloro / UV)
	Cromo	Intercambio iónico / Procesos de membrana
	Dureza total	Ablandamiento químico / Intercambio iónico / Procesos de membrana
	Floruros	Coagulación química / Procesos de membrana
	Nitratos	Coagulación-floculación /Oxidación / Intercambio iónico / Electrodiálisis
	Nitrógeno amoniacal	Coagulación-floculación / Oxidación
	Plomo	Intercambio iónico / Procesos de membrana
	SDT	Coagulación-floculación / Intercambio iónico / Procesos de membrana
	Turbiedad	Oxidación / Filtración (arena y carbón activado)
INT	Cloruros	Intercambio iónico / Procesos de membrana / Destilación
	Molibdeno	Procesos de membrana / Intercambio iónico
	Níquel	Procesos de membrana / Intercambio iónico / Electrodiálisis
	Nitritos	Coagulación-floculación /Oxidación / Intercambio iónico / Electrodiálisis
	Manganeso	Oxidación-filtración / Intercambio iónico / Membranas
	Sulfatos	Precipitación química / Intercambio iónico / Procesos de membrana

El análisis estadístico del universo de datos recopilados (Anexo A) contiene valores tales que hacen que la desviación estándar sea entre dos y seis veces mayor que el promedio aritmético, principalmente para metales pesados (Aluminio, Antimonio, Bario, Cadmio, Cobalto, Manganeso, Mercurio, Níquel, Zinc), formas nitrogenadas (Nitratos, Nitrógeno Amoniacal), Microorganismos (Coliformes totales, Coliformes fecales, Shigella), parámetros de toxicidad (Talio, Tolueno) y otros. Esta dispersión de datos implica que la selección y dimensionamiento de los procesos unitarios no permita un diseño preciso del tren de tratamiento necesario, ya que puede quedar sobre o sub-dimensionado. Por lo anterior se decidió realizar una discriminación de datos, por medio de un análisis de frecuencias, para disminuir la incertidumbre

sobre la calidad media del acuífero y facilitar la selección de procesos de tratamiento para el agua de los acuíferos del Valle del Mezquital. El análisis de frecuencias realizado se presenta en el Anexo B.

La segregación de datos dio como resultado la Tabla 8 que indica la media aritmética, la desviación estándar y el valor máximo para cada parámetro contaminante seleccionado, de igual forma muestra el valor propuesto para el diseño del tren de tratamiento y el objetivo de calidad en el efluente del proceso, sin dejar de lado el cumplimiento de la NOM-127-SSA1-1994. Los parámetros de esta tabla fueron seleccionados basándose en la influencia sobre la contaminación del agua y la representatividad del grupo.

Tabla 8. Objetivos de tratamiento por familias de contaminantes

Familia	Contaminante	Unidad	Norma	Objetivo	A tratar	Max	Media	SDV
Orgánico / Microorganismos	DBO	mg/L	0,00 ⁵	0,00 ⁵	17,90	23,00	12,00	5,90
	DQO	mg/L	0,00 ⁵	0,00 ⁵	21,10	37,00	11,30	9,80
	COT	mg/L	2,00 ⁵	1,00 ⁵	6,00	6,00	6,00	0,00
	Turbiedad	mg/L	5,00 ¹	0,3,00 ⁵	0,86	1,60	0,37	0,49
	Coliformes Fecales	mg/L	0,00 ¹	0,00 ¹	32,30	56,00	22,30	10,00
Inorgánico	Dureza Total	mg/L	500,00 ¹	300,00 ⁵	484,00	531,00	300,00	184,00
	Sodio	mg/L	200,00 ¹	200,00 ¹	337,00	500,00	214,00	123,00
	Cloruros	mg/L	250,00 ¹	225,00 ⁵	277,00	328,00	185,00	92,00
	Sulfatos	mg/L	400,00 ¹	380,00 ⁵	220,80	387,50	130,80	90,00
	SDT	mg/L	1000,00 ¹	1000,00 ¹	1547,00	1950,00	1273,00	274,00
	Silicio ⁶	mg/L			35,70	44,00	29,90	5,80
	Calcio ⁶	mg/L			119,80	165,00	71,80	48,00
	Magnesio ⁶	mg/L			65,00	85,00	45,0	20,00
	Alcalinidad ⁶	mg/L			553,50	580,00	522,50	31,00
Metales Pesados	Aluminio	mg/L	0,20 ¹	0,15 ⁵	1,57	2,60	0,61	0,96
	Cadmio	mg/L	0,005	0,003 ⁴	0,30	0,61	0,11	0,19
	Boro	mg/L	0,50 ²	0,50 ⁴	0,57	0,78	0,33	0,24
	Bario	mg/L	0,70 ¹	0,05 ⁵	0,72	1,60	0,30	0,42
	Antimonio	mg/L	0,02 ²	0,02 ⁴	0,28	0,30	0,14	0,14
	Zinc	mg/L	5,00 ¹	4,50 ⁵	4,80	7,40	1,90	2,90
	Molibdeno	mg/L	0,07 ²	0,07 ⁴	3,80	6,00	2,50	1,30
	Cromo Total	mg/L	0,05 ¹	0,05 ¹	4,30	8,90	2,30	2,00
	Cobre	mg/L	2,00 ¹	1,80 ⁵	6,90	8,40	4,10	2,80
	Plomo	mg/L	0,01 ¹	0,01 ¹	0,76	1,21	0,40	0,36
	Níquel	mg/L	0,02 ²	0,02 ⁴	2,42	3,91	1,36	1,06
Nitrógeno	Nitratos	mg/L	10,00 ¹	9,00 ⁵	16,70	19,00	10,80	5,90
Tóxicos	Tolueno	mg/L	0,70 ¹	0,60 ⁵	1,95	2,07	0,87	1,08
	Talio	mg/L	0,002 ³	0,001 ⁵	0,04	0,06	0,03	0,01

(1) NOM-127-SSA1-1994. (2) EPA 2009, National Primary Drinking Water Regulations. (3) OMS 2006, Guías para la calidad del agua potable. (4) PROY-NOM-SSA1-250-2007. (5) Recomendaciones, algunas inferidas de la NOM-127-SSA1-1994. (6) No se ha propuesto ningún valor límite basado en efectos sobre la salud.

Para las familias propuestas se presentan a continuación algunos procesos de tratamiento recomendados para el control de dichos contaminantes de acuerdo con la literatura consultada. El primer grupo contiene indicadores orgánicos y de microorganismos para el cual se recomienda el uso de Coagulación-Floculación, Filtración, Biofiltros, Nanofiltración (NF), Oxidación, Ultrafiltración (UF) o Microfiltración (MF) más una desinfección adecuada. Los parámetros inorgánicos pueden ser eliminados o reducidos por medio de: Ablandamiento con Cal (pH 10), NF, Intercambio Iónico (IO) y Electrodiálisis Reversible (EDR) principalmente.

Para el tercer grupo, de los metales pesados, se recomiendan: Ablandamiento con Cal, NF, IO y EDR. Los nitratos pueden reducirse con Biofiltros para desnitrificación, NF u Ósmosis Inversa (RO). Los componentes indicadores de toxicidad deben ser tratados con Carbón Activado Granular (CAG) y Oxidación Avanzada.

Los contaminantes emergentes, no incluidos en la Tabla 8, deben ser reducidos al mínimo independientemente de su concentración en el agua, como medida de control dado el desconocimiento de sus efectos de largo plazo sobre la salud humana, para ello los expertos en la materia recomiendan la Precipitación, CAG, Oxidación Avanzada, Biofiltración y NF.

Para potabilizar esta agua se propone un esquema de multibarreras que trate los grupos principales de contaminantes encontrados: microbiológicos y materia orgánica natural, metales pesados, inorgánicos, tóxicos y contaminantes emergentes. Para ello planteo un proceso centrado en filtración avanzada, pues permite con seguridad remover la mayor parte de los iones y moléculas presentes. A la cabeza del proceso se requiere un pretratamiento para acondicionar el agua y garantizar una mayor eficiencia del proceso central, y al final una etapa de postratamiento consistente principalmente en una desinfección y, en su caso, del ajuste de otros parámetros de calidad de acuerdo con la NOM 127.



Figura 9. Esquema general de potabilización del Valle del Mezquital.

De la Figura 9 pueden establecerse variantes en cuanto al tipo de filtros avanzados, el pretratamiento adecuado y los procedimientos de desinfección requeridos en el sistema, estos procesos unitarios y su combinación serán determinados en función del análisis de tratamientos recomendados por familia de contaminantes.

3.3 Diseño de esquema multibarreras

De acuerdo con las características del agua a tratar, el principal objetivo la eliminación de nitratos, metales pesados, coliformes fecales y totales, materia orgánica (COD), indicadores de toxicidad y contaminantes emergentes; en general los establecidos en la Tabla 8. Para tal efecto se describe a continuación una alternativa diseñada de acuerdo con la calidad del agua determinada y los objetivos de tratamiento propuestos.

El esquema de multibarreras diseñado para el aprovechamiento de los acuíferos del Valle del Mezquital inicia desde el *tratamiento Suelo – Acuífero*, donde se lleva a cabo la función típica de tratamiento secundario de aguas residuales, sin embargo, una vez que el nuevo sistema de aprovechamiento este instalado y en funcionamiento, no está claro si el agua va a recibir el mismo nivel de tratamiento natural.

El siguiente proceso propuesto, basado en los datos disponibles, consiste en un *acondicionamiento* para eliminar los nitratos y metales pesados y reducir el contenido orgánico (medido como Demanda Bioquímica de Oxígeno, DBO) del agua, similar al tratamiento avanzado de aguas residuales. El efluente de esta primera etapa del sistema de tratamiento mecanizado se descarga a un vaso de almacenamiento propuesto para su *naturalización*, que proporcionará aproximadamente 30 días de detención y se prevé la reducción de la DBO restante.

La etapa final del proceso toma el agua del embalse para su *potabilización*, aquí se removerá la turbiedad y se eliminarán los patógenos restantes (desinfección) y, si es necesario, se reducirán sales (sodio, cloruro, Sólidos Disueltos Totales). Ambas etapas del tratamiento mecanizado (pre- y post-embalse) incluyen procesos para la reducción de muchos contaminantes emergentes.

3.3.1 Suelo - Acuífero

El tratamiento de aguas residuales mediante recarga artificial (SAT) que se aplica actualmente en los acuíferos del valle del Mezquital, Hgo., tiene diferencias importantes con la definición conceptual del proceso, ya que en este caso la recarga al acuífero se hace antes de algún tratamiento (Figura 10) y posteriormente se obtiene un efluente de mejor calidad que es empleado para complementar el riego agrícola en diversas zonas de los distritos de riego y como fuente de abastecimiento de agua potable en algunas localidades.

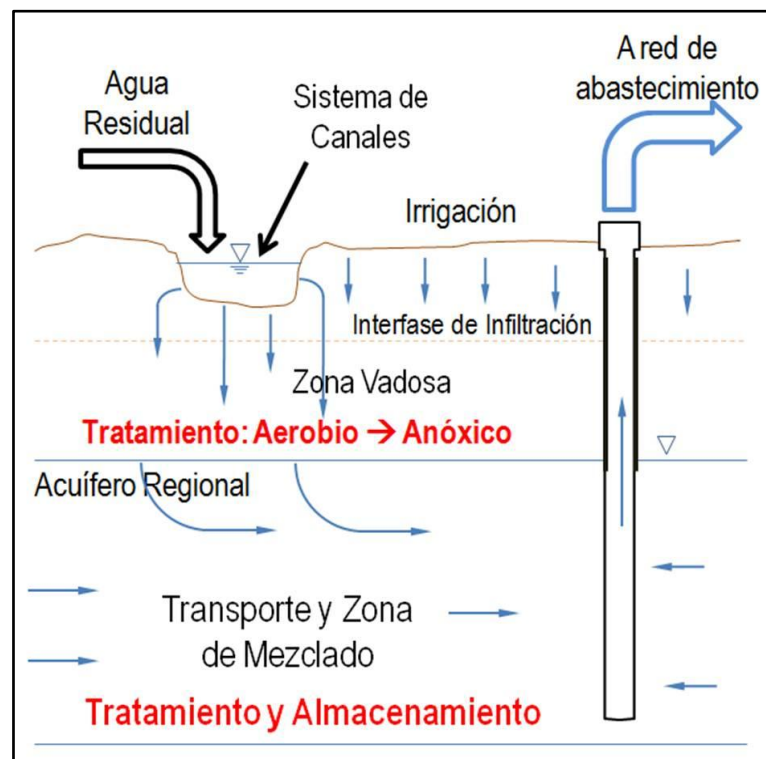


Figura 10. Funcionamiento del sistema SAT en el valle del Mezquital

A pesar de que el sistema SAT está muy estudiado para la recarga artificial de acuíferos como medida para la recuperación de agua, se desconoce el funcionamiento de los procesos de saneamiento en el caso del valle del Mezquital y por tanto de los límites naturales del suelo para este tratamiento, sin embargo, los resultados de análisis realizados en más de 14 años indican que se ha logrado un tratamiento equiparable a nivel secundario ya que el acuífero cumple la mayor parte de los límites para una fuente de abastecimiento para uso público urbano marcados en la Ley Federal de Derechos (ver Tabla 9).

Aunque los resultados anteriores son alentadores, es importante resaltar que en este momento no es posible precisar la calidad del acuífero o de la mezcla proveniente de los distintos campos de extracción dada la dispersión de datos y la variabilidad de los mismos, por lo que se recomienda un la implementación de un programa de muestreo bien estipulado y vigilado.

Tabla 9. Comparación de calidad del agua: SAT Valle del Mezquital vs. Ley Federal de Derechos.

Parámetro	%	Agua Residual	Acuífero	FAUPU ⁸
Microbiológicos				
Coliformes Totales (NMP/100mL)	99.9	6.10E+10	1.31E+3	1.00E+3
Huevos de Helminto (mg/L)	99.9	18.00	ND	-
Nutrientes				
Nitratos * (mg/L)	72.6	37.00	10.13	10.0*
Fósforo total (mg/L)	64.8	2.70	0.95	1.00*
Nitrógeno Amoniacal (mg/L)	97.9	34.00	0.72	-
Metales				
Hierro (mg/L)	93.6	1.10	0.07	0.30
Boro (mg/L)	54.2	1.07	0.49	1.00
Componentes Orgánicos/Carbón				
SAAM (mg/L)	91.7	8.10	0.67	0.50
COT (mg/L)	95.3	112.12	5.30	-
COD (mg/L)	97.5	476.00	12.00	0.00
Sales y Compuestos Disueltos				
SST (mg/L)	70.6	118.00	34.70	50.00

3.3.2 Acondicionamiento

En resumen el tratamiento pre-embalse consiste en los siguientes procesos: Filtros desnitrificadores (CAG) > Ablandamiento > Remineralización > Aeración.

En primer lugar, los nitratos son removidos con un filtro de carbón activado granular biológicamente activo (CAG) por conversión biológica de nitrato a gas nitrógeno. Puede requerirse adicionar carbono y fósforo para mejorar la eficiencia del proceso, la dosificación puede definirse con pruebas de laboratorio previas (pruebas de jarras). El filtro biológico de CAG también deberá reducir el material orgánico volátil, como el tolueno. Cabe señalar que, debido a que el agua es de una fuente de agua subterránea, el contenido total de sólidos en suspensión (SST) es mínimo. Con un mínimo sólidos de carga, se recomienda que los filtros desnitrificadores se coloquen a la cabeza de la instalación para aprovechar las ventajas del contenido de carbono y fósforo en el agua de alimentación. La colocación de estos filtros aguas abajo de los clarificadores de eliminación de metales pesados no proporcionará mayor beneficio para los filtros.

Tras la eliminación de nitratos, los metales pesados se eliminan en un proceso, de una o dos fases, que será verificado por un banco de pruebas a escala. Un proceso emplea un coagulante sulfato férrico y otro emplea cal/sosa para ablandamiento, que requiere un pH de aproximadamente 11 a 12. El proceso de sulfato férrico prevé precipitar parte del contenido de cromo, plomo y cadmio. El proceso de ablandamiento prevé reducir bario para la mejora de los procesos de extracción de sales (Electrodiálisis reversible o Nanofiltración), como aluminio, cadmio, níquel, boro y zinc, de igual manera el restante de cromo y plomo. Las pruebas de jarras determinarán si es posible combinar estos procesos de tratamiento y la conveniencia de utilizar una o dos etapas. Se proponen dos alternativas para los clarificadores: clarificadores de contacto de sólidos o clarificadores reactor de flujo ascendente con recirculación interna. Los lodos procedentes de los clarificadores pasan a espesamiento y deshidratación para su disposición.

Tras el sistema de ablandamiento con cal, se propone la re-mineralización con dióxido de carbono. El agua suavizada después del proceso de re-mineralización es enviada a una cascada de roca natural en el

⁸ Fuente de abastecimiento para uso público urbano. Ley Federal de Derechos. Última Reforma DOF 15-12-2011.

extremo superior del embalse. Esta cascada aumentará el oxígeno disuelto del agua antes de entrar en el embalse. Periódicamente, puede ser necesario controlar las algas en el vaso; por lo tanto, se recomienda el diseño de un sistema de adición de sulfato de cobre cerca de la cascada propuesta.

Se prevé que el nivel de nitrato en el efluente del tratamiento pre-embalse será inferior a 6 mg/L, basándose en los datos disponibles. Los metales pesados se quitarán aproximadamente de 90 al 95 por ciento en esta primera etapa, que será determinado por las pruebas de jarras y el monitoreo adicional de calidad de agua.

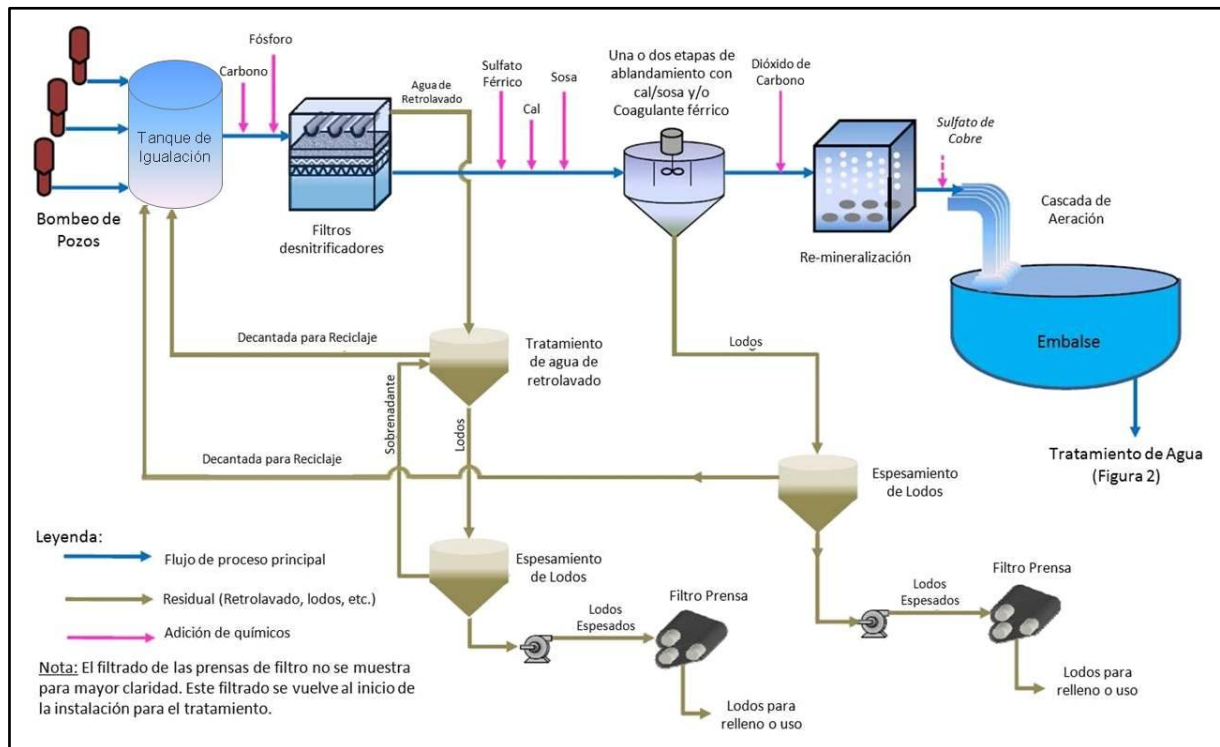


Figura 11. Proceso de Acondicionamiento

3.3.3 Embalse

Una de las premisas de este diseño es que el embalse se comportará como un *lago oligotrófico*, con baja productividad primaria, como resultado del bajo contenido de nutrientes. Estos lagos tienen baja producción de algas y, consecuentemente, poseen aguas sumamente claras, con alta calidad de agua potable. Las aguas superficiales de estos lagos tienen típicamente mucho oxígeno; por lo que, tales lagos soportan muchas especies de peces, como truchas de lago, que requieren aguas frías y bien oxigenadas.

En los cuerpos de agua en reposo como los lagos y embalses es común que se presente estratificación, inversión y mezclado estacionales, debido a las acciones del viento, las densidades del agua y como respuesta a las temperaturas. Los cambios de temperatura estacionales provocan que exista una circulación vertical, conforme el agua de la superficie cambia su densidad y su temperatura el agua más ligera se sitúa por encima de la de mayor densidad provocando que el agua esté separada en dos cuerpos de agua relativamente independientes, por ende la calidad del agua en las dos secciones es diferente.

El embalse que se propone debe ser construido con una capacidad tal que garantice cuando menos 60 días de retención para que cumpla con los procesos de naturalización requeridos. Es importante tomar en cuenta que el embalse debe protegerse de la escorrentía de aguas pluviales que puedan estar contaminadas por aguas residuales, las aguas residuales del área no deben eliminarse a través de ríos o áreas de drenaje

que descarguen en el vaso. Ya que los procesos superficiales no proveen el tiempo de residencia y los beneficios de la recarga del acuífero se requiere de un tratamiento posterior [WEF & AWWA, 2008].

3.3.4 Potabilización

En resumen el tren de tratamiento post-embalse se compone de los siguientes procesos: Físico Químico (coagulación-floculación) > Membranas de alta presión (Ultrafiltración) > Filtro de Carbón Activado > Prefiltración (Filtros Cartucho) > Electrodiálisis reversible (EDR) > Ajuste de pH > Desinfección (Cloración).

El agua es extraída desde el extremo inferior de la presa con una obra de toma con profundidades múltiples de admisión que deben ser proporcionalmente aisladas entre sí para garantizar la flexibilidad en la calidad del agua tomada. Se prevé que el agua tenga calidad similar a la del efluente del acondicionamiento.

El objetivo central de la etapa post-embalse de tratamiento es la eliminación de orgánicos restantes, turbidez, eliminación de patógenos (desinfección), y la reducción de sodio y cloruro (Sólidos Disueltos Totales, SDT). El agua es tratada primero por un sistema de membrana de ultrafiltración (UF). El coagulante puede ser añadido, así como el cloro, al agua influente; esta adición de sustancias químicas será determinada durante las pruebas de jarras. Basándose en los resultados de las pruebas de laboratorio, puede ser necesario incluir tanques de floculación y sedimentación en el proceso aguas arriba del sistema de membranas de UF.

Tras el sistema UF, el agua fluye a través de filtros de contacto biológico CAG para eliminación adicional de carbono orgánico total (COT), componentes de olor, sabor y otros microconstituyentes. La reducción de COT ayuda con el control de subproductos de desinfección durante el proceso de desinfección. Tras el sistema CAG, una parte del agua tratada es bombeada a través de filtros de cartucho y EDR para la reducción de sales. El efluente de EDR a continuación se mezcla con el filtrado UF restante, se ajusta el pH, se agrega cloro adicional y enseguida se conduce a un tanque de almacenamiento para bombear a la red de distribución.

Antes de la cloración, el efluente de la planta potabilizadora puede ser empleado para la recarga de acuíferos, aunque deberán hacerse los estudios correspondientes de la NOM-014-CONAGUA-2003, *Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada*.

La calidad del efluente debe ser vigilada y ajustarse para congruencia con la hidrogeoquímica de las aguas subterráneas en la zona de recarga o con la normatividad vigente en caso que se ponga directamente en la distribución de agua potable. Ajustar la calidad significa reducir el potencial de problemas asociados con la mezcla de diferentes características de las aguas y con el cumplimiento de los estándares de calidad exigidos.

Las pruebas de jarras determinarán si los metales son reducidos adecuadamente por los procesos de tratamiento. En caso de que los metales no están suficientemente reducidos, puede ser necesario implementar nanofiltración u ósmosis inversa en lugar de EDR para alcanzar los objetivos de calidad establecidos.

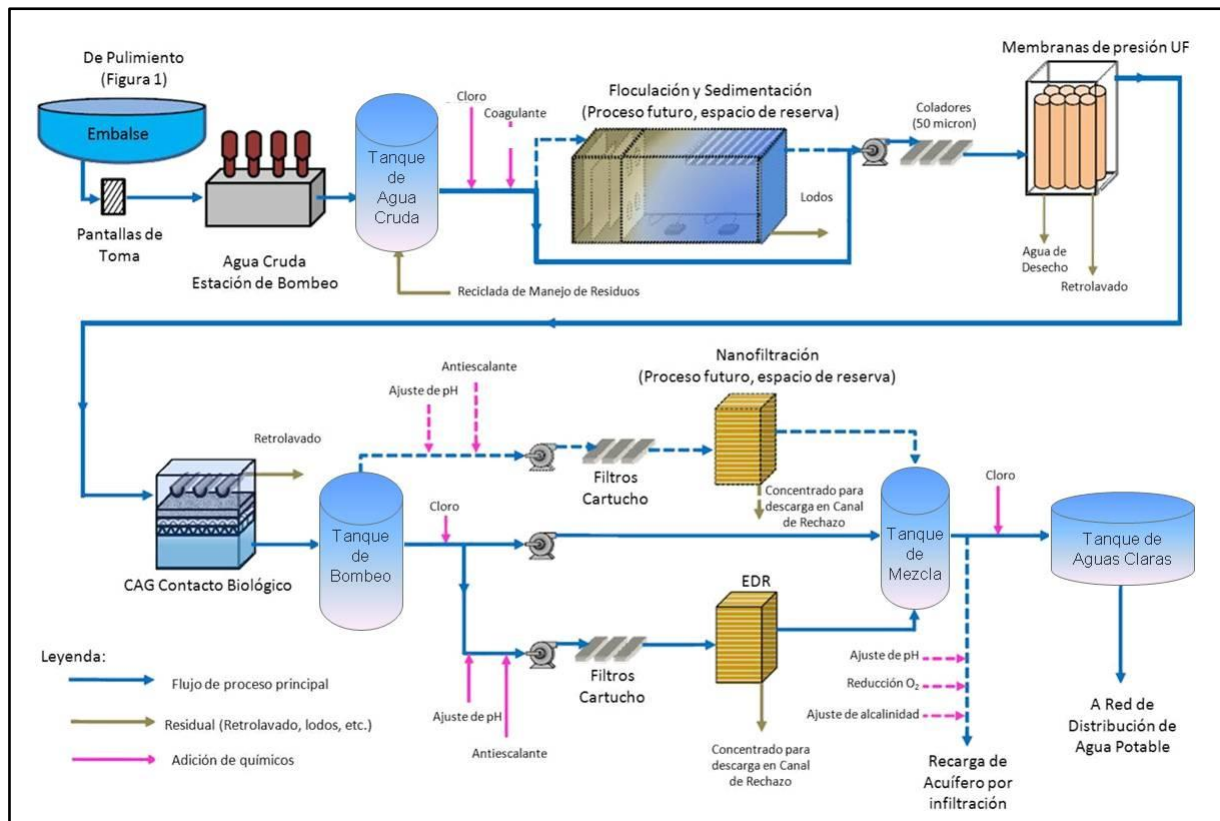


Figura 12. Proceso de Potabilización

3.3.5 Manejo de Lodos

El manejo y disposición de lodos debe considerarse ya que llega a representar hasta el 50% de los gastos de operación de una planta de tratamiento, el tratamiento del lodo reduce el contenido de agua y estabiliza la materia orgánica e inorgánica que pudiera ser putrescible. El lodo estabilizado puede ser dispuesto en vertederos controlados, usado como mejorador de suelos, como cubierta de rellenos sanitarios o como sustrato en digestores anaerobios para producción de biogás.

Los lodos provenientes de los procesos de retrolavado (Filtros, Membranas, CAG) y de los tanques de floculación-sedimentación, serán tratados únicamente con decantación y espesamiento concluyendo con un filtro prensa para su aplicación posterior o secado en algún sitio de disposición final. El agua decantada en el manejo de estos residuos se regresará al inicio del proceso de la planta de tratamiento.

En el caso de las aguas de desecho se requiere de un canal que lleve estas a una disposición final, por la zona del proyecto, se propone que se desechen en el Gran Canal ya que no influirían ni en el caudal ni en la concentración que espera recibir la PTAR Atotonilco.

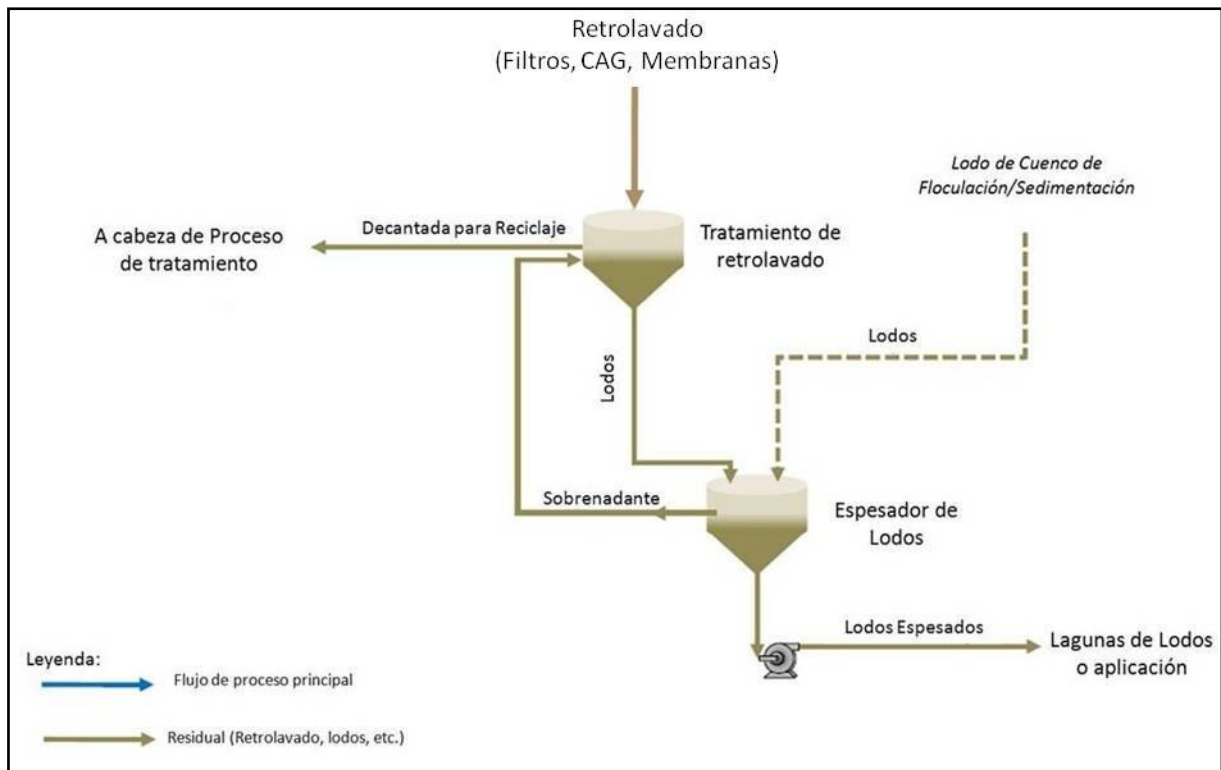


Figura 13. Proceso de manejo de lodos generados

3.4 Consideraciones adicionales

En la zona del Valle del Mezquital no existe un monitoreo constante de la evolución de la calidad del agua, con fines a su aprovechamiento para consumo humano, en todos los pozos. Además, la variabilidad de las condiciones geohidrológicas y de construcción de pozos otorga características de calidad distintas a cada sitio, por lo que es difícil predecir con certeza el comportamiento de la mezcla final. Por ello se requiere de la implementación de una planta piloto que demuestre la factibilidad de este proceso multibarreras.

Para la puesta en marcha del esquema de tratamiento propuesto a nivel piloto se requiere de un programa de monitoreo eficiente que minimice los riesgos por variaciones de calidad, en pozos claramente seleccionados para el proyecto y que posean las características constructivas adecuadas que garanticen la mínima o nula influencia del agua superficial (de retorno agrícola principalmente) sobre el agua de los acuíferos especialmente en los primeros 25 m de profundidad.

Este programa de monitoreo debe complementarse con pruebas de tratabilidad a nivel laboratorio (pruebas de jarras), que permitan la ejecución del proyecto a nivel piloto y al final un tren de tratamiento adecuado que garantice la mayor vida útil para cada elemento de los procesos unitarios involucrados bajo las condiciones de trabajo establecidas.

4.0 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Verificación de la hipótesis

Al inicio de este proyecto el objetivo planteado fue determinar la factibilidad de tomar el agua de los acuíferos del valle del Mezquital en un contexto de seguridad y confiabilidad para establecerla como una “nueva” fuente de abastecimiento, y tras el desarrollo de los capítulos que anteceden a este puede afirmarse que la hipótesis inicial se cumple, ya que los resultados de calidad del agua de los pozos de los acuíferos del Valle del Mezquital, después de la segregación de datos, realizan un tratamiento de las aguas residuales de la ZMVM aproximado al nivel secundario.

Aún cuando no se tiene certeza absoluta de la calidad del agua de los acuíferos del Valle del Mezquital, los resultados muestran que mantiene estándares asequibles de calidad, lo que indica su viabilidad como fuente de abastecimiento de agua potable después de un tratamiento bajo un esquema multibarreras, que, por medio de diferentes procesos, permita cumplir con la normatividad de agua potable y las recomendaciones internacionales para garantizar que sea una fuente segura y confiable.

Los indicadores de contaminación que más preocupan son los metales pesados y contaminantes emergentes ya que ameritan una intervención especial con tratamientos avanzados. La presencia de microorganismos y sus niveles pueden explicarse por la falta de protección sanitaria en el muestreo. La mayoría de los parámetros relacionados con la salinidad se supone como resultado de las prácticas agrícolas. Los pozos considerados exceden los límites establecidos aluminio, fluoruros boro, sílice, cobre y zinc. No existen indicios de radiactividad en el agua de los acuíferos del valle del Mezquital.

Independientemente de que se use o no esta nueva fuente para suministrar agua a la Zona Metropolitana del Valle de México (Pachuca forma parte de la nueva delimitación oficial), es necesario contar con un sistema de potabilización apropiado para disminuir los riesgos de salud a la población que actualmente consume agua de origen subterráneo.

El Valle del Mezquital puede constituirse como una fuente apta para el reúso indirecto potable y como fuente de abastecimiento para zonas urbanas como la ZMVM. La disponibilidad de agua en los acuíferos es suficiente para complementar el abastecimiento a la ZMVM, sin perder de vista que es necesario implementar otras acciones que coadyuven a mitigar el problema de desabasto y déficit actuales.

Después de analizar las tecnologías actuales, que permiten llevar agua de casi cualquier origen a un grado de calidad tal que permita el consumo humano, se propone un esquema de tratamiento de barreras múltiples considerando la importante aportación de la naturaleza con el tratamiento en el subsuelo y con la naturalización en el embalse. A pesar de los resultados favorables es de hacer notar que el número de pozos muestreados es muy pequeño comparado con el total de pozos que pudiese requerir un sistema de aprovechamiento para extraer más de 7 m³/s por lo que se recomienda seguir un programa de muestreo y vigilancia como el descrito en el subcapítulo 4.2 de este documento.

Es necesario implantar un esquema de pruebas de jarras y la planta piloto para confirmar o rectificar el funcionamiento de los procesos unitarios seleccionados, sin dejar de lado los costos de inversión, operación, mantenimiento y financiamiento para que sea un proyecto atractivo que permita promover la inversión pública y privada.

4.2 Programa de muestreo y pruebas de jarras

El programa de muestreo consiste en los siguientes pasos básicos para determinar los parámetros que definan la calidad del agua a tratar.

⊕ *Selección de sitios de muestreo.*

Evaluar aquellos sitios que ofrezcan mejores condiciones geohidrológicas como pozos para pruebas hidráulicas (de bombeo), pozos de observación y la factibilidad de muestrear en pozos de abastecimiento existentes. Los aprovechamientos de agua subterránea o estructuras citadas que sirvan para el muestreo deberán contar de preferencia con una limpieza y/o desarrollo a fin de obtener muestras representativas y confiables y deberán contar con adaptaciones para facilitar ser sondeados periódicamente.

Respecto a la selección de pozos de muestreo, siguiendo la metodología establecida en la NOM-014-SSA1-1993 “Procedimientos sanitarios para el muestreo de agua para uso y consumo humano en sistemas de abastecimiento de agua públicos y privados”, se tienen los siguientes pasos, sujetos a las recomendaciones anotadas:

Primero se elegirán los parámetros y datos de interés para la selección de pozos, los cuales pueden ser, de manera enunciativa más no limitativa, los siguientes:

- Volumen disponible según balance hídrico,
- Rendimiento promedio de pozos existentes,
- Nivel dinámico de operación,
- Índice de calidad del agua (ICA)
- Equipamiento y adaptaciones para sondeos del pozo

Adicionalmente, la distribución espacial, debe cumplir con lo siguiente:

- Debe haber una distribución uniforme de los puntos de muestreo a lo largo del sistema.
- Los puntos se localizarán dependiendo del tipo de sistemas de distribución y en proporción al número de ramales
- Evidencia de que el pozo seleccionado tiene una constitución similar a la que se proyecta construir (profundidad, ademe, filtro, sello y protecciones).

⊕ *Programa de muestreo.*

La información recabada se hará de acuerdo con un programa de muestreo y monitoreo donde se señale entre otras cosas el número, tamaño, forma de colección, tiempos, sitios, secuencia, duración, distribución por zona acuífera y parámetros a medir. El programa de muestreo consistirá en establecer una red de control y monitoreo de calidad y niveles del agua, mediante:

- a) Identificar seis pozos en cada campo de extracción donde se identifiquen diferencias geohidrológicas significativas, seleccionados de acuerdo a los criterios descritos en párrafos anteriores.
- b) Los pozos seleccionados, o perforados explícitamente para muestreo, deberán tener bomba a la profundidad aproximada propuesta para los nuevos pozos, y reflejar la cobertura geográfica de cada campo, con la adecuada separación entre los pozos. Los pozos deben estar protegidos de la contaminación superficial y subsuperficial.
- c) Una vez que se identifiquen los pozos que cumplan con las características descritas, se tomarán muestreos compuestos conforme a las normas vigentes, cada uno con frecuencia bimestral durante un año. Las muestras deberán tomarse sin cloro y después de que el pozo haya tenido el tiempo suficiente para purgar la tubería de descarga y llegar a estabilizar parámetros de campo como pH, temperatura y conductividad eléctrica.
- d) El muestreo y las pruebas deberán realizarse para los parámetros requeridos, con identificación de los métodos de prueba. Las muestras deberán preservarse, según sea necesario por los métodos de ensayo

aplicables, además de que se harán pruebas in situ de parámetros como temperatura, pH, y oxígeno disuelto, que pueden cambiar con el tiempo. Los parámetros a determinar se enlistan en la Tabla 10.

Tabla 10. Parámetros para evaluar la calidad del agua de los acuíferos del Valle del Mezquital

Parámetros	Unidad	Parámetros	Unidad
Microbiológicos		Metales	
Coliformes totales	NMP/100ml	Aluminio	mg/L
Coliformes fecales	NMP/100ml	Arsénico	mg/L
E. histolytica	H/L	Bario	mg/L
Estreptococos fecales	UFC/ml	Boro	mg/L
Huevos de Helminfos (3 variedades)	HH/L	Cadmio	mg/L
Salmonella	UFC/ml	Calcio	mg/L
Shigella	UFC/ml	Cianuros	mg/L
Físicos		Cobalto	mg/L
Turbiedad	UTN	Cobre	mg/L
Conductividad	µmhos/cm	Cromo total	mg/L
Sólidos disueltos Totales	mg/L	Fierro	mg/L
Sólidos suspendidos totales	mg/L	Magnesio	mg/L
Sólidos totales	mg/L	Manganeso	mg/L
Potencial redox	mV	Mercurio	mg/L
Temperatura	o C	Níquel	mg/L
pH		Potasio	mg/L
Organolépticos		Plomo	mg/L
Color		Sodio	mg/L
Olor		Zinc	mg/L
Sabor		No metales	
Químicos		Fósforo	mg/L
Alcalinidad Total (como CaCO ₃)	mg/L	Oxígeno Disuelto	mg/L
Alcalinidad a la fenolftaleína. (como CaCO ₃)	mg/L	Sulfuros	mg/L
Carbonatos (como CaCO ₃)	mg/L	Cloruros (como Cl ⁻)	mg/L
Bicarbonatos (como CaCO ₃)	mg/L	Dureza total (como CaCO ₃)	mg/L
Hidróxidos (como CaCO ₃)	mg/L	Cloro residual libre	mg/L
Carbono Orgánico Total	mg/L	Yodo residual libre	mg/L
Carbono Orgánico Disuelto	mg/L	Compuestos orgánicos Aromáticos	
DQO total	mg/L	Fenoles	mg/L
DQO soluble	mg/L	Benceno	µg/L
DBO5 total	mg/L	Etilbenceno	µg/L
DBO5 soluble	mg/L	Tolueno	µg/L
Trihalometanos Totales	mg/L	Xileno (orto, meta y para)	µg/L
Radiactividad Alfa	Bq/L	Cresol (orto, meta y para)	µg/L
Radiactividad Beta	Bq/L	Cloroformo	µg/L
Sustancias Activas al Azul de Metileno	mg/l	Tetracloruro de carbono	µg/L
Inorgánicos		Plaguicidas	
Fluoruros	mg/L	Aldrín y Dieldrín	µg/L
Nitrógeno Total, (NTK)	mg/L	Clordano	µg/L
Nitratos (N-NO ₃)	mg/L	DDT	µg/L
Nitritos (N-NO ₂)	mg/L	Lindano	µg/L
Nitrógeno amoniacal (N-NH ₄)	mg/L	Metoxicloro	µg/L
Sulfatos (SO ₄ ⁻)	mg/L	Hexaclorobenceno	µg/L
		Heptacloro y epóxido de heptacloro	µg/L
		2,4-D	µg/L

- e) Deberá llevarse un registro detallado de las características del pozo, los parámetros de calidad evaluados y la variación de los mismos a lo largo del periodo de muestreo.

Referencias bibliográficas

- ARBER, Rick & Beebe, Mark.: “*Colorado’s first indirect potable reuse project*”.
- ARENAL, del, R. “*Estudio hidrogeoquímico de la porción Centro – Oriental del valle del Mezquital, Hidalgo*”.
- Nota de BBCMundo.com (2008). “*El dilema de las aguas residuales*” http://news.bbc.co.uk/go/pr/fr/-/hi/spanish/science/newsid_7567000/7567969.stm Publicada: 2008/08/18 16:59:22 GMT.
- BECERRIL, Elias. (2009) “*Contaminantes emergentes en el agua*”. Revista Digital Universitaria, Vol. 10 No. 8.
- BGS, British Geological Survey, Comisión Nacional del Agua, London School of hygiene and tropical Medicine and University of Birmingham. Department for International Development. (1998) “*Impact of wastewater reuse on groundwater in the Mezquital Valley, Hidalgo State, Mexico. Final Report*”.
- CAPELLA, S. y Labastida, C. “*Acuífero del Mezquital. Pruebas de tratamiento: carbón activado, nanofiltración y ósmosis inversa. Análisis de compuestos orgánicos*”.
- CEPIS. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. (2002) “*Estudio complementario del caso Mezquital, Estado de Hidalgo, México*”. Sistemas integrados de Tratamiento y Uso de Aguas Residuales en América Latina: Realidad y Potencial.
- CERVANTES–Medel, A. y Armienta, M. (2004) “*Influence of faulting on groundwater quality in Valle del Mezquital, México*”.
- CISNEROS, O. (2006) “*Aguas Residuales para Riego Agrícola en México: El caso del D.R. 03 Tula, Hidalgo (Valle del Mezquital)*”. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- CISNEROS, O. (2006) “*El consumo de agua en México (la opción del reúso)*”. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- City of San Diego (2006). “*City of San Diego Water Reuse Study 2005: Final Draft Report, March 2006*”. Prepared in coordination with Water Department, City of San Diego, PBS&J, and McGuire/Prine, San Diego, CA.
- CLEUVERS, M. (2003) “*Aquatic ecotoxicity of pharmaceuticals including the assessment of combination effects*”. Toxicology Letters 142:185-194.
- COLPOS, Colegio de Posgraduados. (2001) “*Cadmio, Níquel y Plomo en agua residual, suelo y cultivos en el Valle del Mezquital, Hidalgo, México*”.
- COMMISSION for European Communities. (2004) “*Annex 14: Summary profiles of chemicals with information on use, production, emission, monitoring and legal status in ‘Towards the establishment of a priority list of substances for further evaluation of their role in endocrine disruption’*”.
- COMMITTEE to Evaluate the Viability of Augmenting Potable Water Supplies with Reclaimed Water. National Research Council. National Academy of Sciences. (1998) “*Issues in Potable Reuse: The Viability of Augmenting Drinking Water Supplies with Reclaimed Water*”.
- CONAGUA, Comisión Nacional del Agua. (2010) “*Estadísticas Agrícolas de los distritos de riego. Año agrícola 2008 – 2009*”.
- CONAGUA, Comisión Nacional del Agua. (2011) “*Estadísticas del Agua en México*”.

- DOF, Diario Oficial de la Federación. (2000) “*Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización*”. Secretaría de Salud. Publicada el 22 de noviembre de 2000
- DOF, DOF, Diario Oficial de la Federación. (2011) “*Ley Federal de Derechos*”. Última reforma publicada DOF 15-12-2011.
- DIARIO Oficial de las Comunidades Europeas, (1998) “*Directiva 98/83/CE del consejo de noviembre de 1998 relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano*”.
- DOWNS, T., Cifuentes, E., Ruth, E. & Suffet, I. (2000) “*Effectiveness of natural treatment in a wastewater irrigation district of the Mexico City Region: A Synoptic Field Survey*”. Water Environment Research; ProQuest Agriculture Journals.
- EPA. United States Environmental Protection Agency. (1976) “*National interim primary drinking water standards*”.
- EPA. United States Environmental Protection Agency. (2004) “*Guidelines for Water Reuse*”.
- EPA, United States Environmental Protection Agency. (2009) “*List of drinking water contaminants and MCL's. National Primary Drinking Water Regulations*”.
<http://www.epa.gov/safewater/contaminants/index.html>
- EPA, United States Environmental Protection Agency. (2010) “*Water Recycling and Reuse: The Environmental Benefits*”. <http://www.epa.gov/region9/water/recycling/>
- SACM. Sistema de Aguas de la Ciudad de México. (2009) “*Estudio de factibilidad técnica – económica – financiera y social del sistema de extracción – captación – conducción y entrega del agua del acueducto Valle del Mezquital - Zona Metropolitana del Valle de México y recopilación de estudios para profundizar en la fuente de captación, el lugar y fuente de entrega, el tipo de tratamiento, efecto (de largo plazo) por consumo de agua en la población de Tula para descartar incidencia de enfermedades en la población*”. Elaborado por F Glez Consultores y Asociados.
- GESAP, GEC Sanitation Programme. GEC, Global Environment Center. “*Water and Wastewater Reuse*”; disponible en <http://nett21.gec.jp/GESAP/themes/themes2.html>
- GIAP, L. C. (2005). “*NEWater – Closing the Water Loop*”. The Int. Desal. Water Reuse Quar. 15, 3, 34-36.
- Gutierrez, S. & Silva, B. “*Aplicación de un modelo hidrogeoquímico en el Valle del Mezquital, Hidalgo*”. CONAGUA, Comisión Nacional de Agua.
- Jaime, C. (2005) “*El agua en la producción agrícola*”. Vertientes.12 (115): 1,7 pp.
- JIMÉNEZ, B. & Chávez, A. (2004) “*Quality assessment of an aquifer recharged with wastewater for its potential use as drinking source ‘El Mezquital valley’ case*”
- JIMÉNEZ, B., López, N. y Sotomayor, C. (1997) “*Estudio de la calidad y suministro del agua para consumo doméstico en el Valle del Mezquital. Informe final*”. Instituto de Ingeniería, UNAM. Proyecto 5322 elaborado para la Comisión Nacional del Agua.
- JIMÉNEZ, B., Cruickshank, C., Capella, S., Chávez, A., Palma, A., Pérez, R. y García, V. (1999) “*Estudio de la factibilidad de empleo del agua del acuífero del Valle del Mezquital para suministro del*

Valle de México”. Elaborado para la Comisión Nacional del Agua por el Instituto de Ingeniería, UNAM. Proyecto 8384.

JIMÉNEZ, Chávez, Gibson, Becerril, Murillo, Ródas y Silva. (2007) “*Estudio científico técnico para mejorar las condiciones de aplicación al suelo del agua residual para el riego del Valle del Mezquital (Manejo y operación como un SAT, Soil Aquifer Treatment)*”. SEMARNAT-2002-01-0519-CONACYT, México.

JIMÉNEZ, B. & Chávez, A. (1999) “*Evaluación de la aplicabilidad de membranas para potabilizar el agua del acuífero del Mezquital*”. Elaborado para la Comisión Nacional del Agua por el Instituto de Ingeniería, UNAM. Proyecto 9340. Informe Parcial.

JIMÉNEZ, B., Chávez, A., Gibson, R., Becerril, J., Maya, C. y Hernández, C. (2008) “*Complemento de la caracterización del agua de consumo humano en el valle de Tula*”. Convenio No. PSVM/ODA/ATE/AD13/06. “Trabajos de asesoría técnica especializada para la planeación y ejecución de los estudios, proyectos, servicios y obras de infraestructura hidráulica necesarios para los proyectos de abastecimiento y saneamiento del valle de México”. Proyecto 6344. Fideicomiso del Valle de México.

JIMÉNEZ, B., Murillo, R., Silva, V. y Chávez, A. (2006) “*Detección de compuestos orgánicos en el Soil Aquifer Treatment (SAT) del Valle de Tula*”. XV Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales; 24-26 de Mayo. Expo Guadalajara.

LAW, I. B. (2003). “*Advanced Reuse – From Windhoek to Singapore and Beyond*”.

McKENZIE, C. (2005) “*Wastewater Reuse Conserves Water and Protects Waterways*”.
<http://www.nesc.wvu.edu/ndwc/articles/OT/WI05/reuse.pdf>

METCALF & EDDY (2007). “*Water Reuse: issues, technologies, and applications*”, written by Takashi Asano et al. 1st Ed.

NRC. National Research Council. (1994) “*Ground water recharge using waters of impaired quality*”

NRC. National Research Council. (1998) “*Issues in potable reuse – The viability of augmenting drinking water supplies with reclaimed water*”

Norma oficial mexicana NOM-014-CONAGUA-2003. *Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada.*

Norma oficial mexicana NOM-015-CONAGUA-2007. *Infiltración artificial de agua a los acuíferos.- Características y especificaciones de las obras y del agua.*

Norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994. *Salud Ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.*

Organización Mundial de la Salud. (2006) “*Guías para la calidad del agua potable [recurso electrónico]: incluye el primer apéndice. Vol. 1: Recomendaciones.*” Tercera edición.

PEASSEY A., Blumenthal U., Duncan, M., Ruíz-Palacios G. (2000) “*A review of policy and standards for wastewater reuse in agriculture: A Latin American perspective*”.

PÉREZ, R., Jiménez, R., Jiménez, B., Chávez, A. “*¿El agua del valle del Mezquital, fuente de abastecimiento para el valle de México?*”

PÉREZ, Rosalino. (2001) “*Factibilidad del empleo del agua del Valle del Mezquital como abastecimiento para el Valle de México*”. Tesis para Maestría en Ingeniería Ambiental, ESIA-IPN.

Proyecto de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-SSA1-250-2007, *Agua para uso y consumo humano. Límites máximos permisibles de la calidad del agua, control y vigilancia de los sistemas de abastecimiento.*

QUIPUZCO, Lawrence (2004) “*Valoración de las aguas residuales en Israel como un recurso agrícola: consideraciones a tomar en cuenta para la gestión del agua en el Perú*”. Revista del Instituto de Investigación FIGMMG, Vol. 7, N.º 13, 64-72 Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

RAMÍREZ, E., Lucho-Constantino, C., Escamilla, E. & Dendooven, L. (2002) “*Characteristics, and carbon and nitrogen dynamics in soil irrigated with wastewater for different lengths of time, Bioresource Technology*”.

REPIDISCA. Red Panamericana de Información en Salud Ambiental. (1998) “*Recopilación bibliográfica de la experiencia en el uso de aguas residuales en el Valle del Mezquital su impacto en la salud y el ambiente*”. Editorial Hidalgo.

ROMERO, H. (1997) “*El valle del Mezquital, México. Estudio de caso*”.

SCHIJJEN, J., de Bruin, H., Hassanizadeh, S., de Roda Husman, A. (2003) “*Bacteriophages and clostridium spores as indicator organisms for removal of pathogens by passage through saturated dune sand*”. Water Research 37, 2186–2194.

SCHULMAN, L., Sargent, E., Naumann, B., Faria, E., Dolan, D. & Wargo, J. (2002) “*A human health risk assessment of pharmaceuticals in aquatic the environment*”. Human Ecol Risk Assess 8:657-680;

SFWMD, South Florida Water Management District. UEC, Upper East Coast. (2006) “*Regulation of Wastewater Reuse and Aquifer Storage and Recovery*”. Upper East Coast Water Supply Plan Amendment, Appendix I. http://www.sfwmd.gov/portal/page/portal/pg_grp_sfwmd_watersupply/subtabs%20-%20upper%20east%20coast%20-%20documents/tab1610181/appxi.pdf

SIEBE, C. & Sommer, I. (1995) “*Effects of land application of wastewater from Mexico City on soil fertility and heavy metal accumulation: A bibliographical review*”. Gutiérrez-Ruíz, M.E. Environmental Reviews.

SIEBE, C. & Cifuentes E. (1995) “*Environmental impact of wastewater irrigation in central México: An overview*”. Int. J. Environ. Health Res.

SINGH, S. (2005). “*Singapore offers Recipes for Urban Water Management*”. Asian Water 12, 23-27

STEPHENS, F. (2005) “*Public perception of potable water reuse: Science, Risk and Necessity*”. Gwinnett County Department of Public Utilities, Lawrenceville, GA
<http://www.uga.edu/water/GWRC/Papers/StephensFrank%20panel%20paper%20DRAFT.pdf>

SRIKANTH, R. & Naik, D. (2004) “*Health effects of wastewater reuse for agriculture in the suburbs of Asmara City*”. Eritrea. Int. J. Occup. Environ Health.

THOMPSON, D. E., Rajal, V. B., De Batz, S., & Wuertz, S. (2006) “*Detection of Salmonella ssp. in Water using Magnetic Bead Capture Hybridization Combined with PCR or Real-time PCR*”, Journal Water Health. 4, 67-75.

TORRES Romero, J. L. (2001), “*Potabilización del agua subterránea del valle del Mezquital mediante membranas para el suministro a la ciudad de México*”, Tesis para Maestría en Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, UNAM.

UNAM. Instituto de Ingeniería. (2008) “*Selección de membranas para remover contaminantes emergentes en una fuente de suministro de agua*”. Elaborado para la Comisión Nacional del Agua.

VELÁZQUEZ, Ortega, Martínez, Kohashi y García. (2002) “*Relación funcional PSI-RAS en las aguas residuales y suelos del valle del Mezquital, Hidalgo, México*”.

WATER Department of City of San Diego. Water Reuse Study. (2006) “*Indirect Potable Reuse Opportunities*”.

WEF & AWWA (1998). “*Using Reclaimed Water to Augment Potable Water Resources*”. Water Environment Federation and the American Water Works Association.

WEF & AWWA (2008). “*Using reclaimed water to augment potable water reuse to augment potable water resources: a special publication*”. Prepared by a Joint of Using Reclaimed Water to Augment Potable Water Resources Task Force of the Water Environment Federation and the American Water Works Association. 2nd Ed.

WEBB, S. (2001) “*A data based perspective on the environmental risk assessment of human pharmaceuticals II: aquatic risk characterization. In: ‘Pharmaceuticals in the Environment. Sources, Fate, Effects and Risks’*”. Springer-Verlag; K. Kümmerer, Editor.

ANEXOS

Anexo A: Base de datos de las diversas fuentes de información sobre la calidad del agua subterránea del Valle del Mezquital

A continuación se reproducen los valores reportados por las distintas fuentes consultadas para cada uno de los pozos con información disponible entre 1994 y 2009.

Tabla 11. Información general de los pozos muestreados en el Valle del Mezquital

NP	Nombre del Pozo	Fuente	Año	Gasto (lps)	Abastece (hab)	Nivel Estático (m)
1	Actopan	GALLEGOS	1999	35,0	21 827	2,0
2	Adelaido Azpeitia	CEAA	2008			
3	Ajacuba	BGS	1998	NE	5 340	70,0
4	Atitalaquia	BGS	1998	4,0	5 959	9,0
5	Atotonilco	BGS/JIMENEZ	1998/1997	25,0	5 800	
6	Benito Juárez	BGS	1998	8,0	546	125,0
7	Bothibaji	BGS/JIMENEZ/CEAA	1998/1997/2005			
8	Boxani	BGS	1998	NE	856	NE
9	Cañada Chica	SIEBE	1994			
10	Caxuxi	BGS	1998	30,0	3 681	NE
11	CFE Teocalco	BGS	1998	13,0	NE	14,0
12	CFE Tlaxcoapan	BGS	1998			
13	Chicavasco	BGS/CEAA	1998/2005	8,0	2,371	52,0
14	Col. Veracruz	BGS	1998	25,0	1,441	80,0
15	Col. Veracruz 2	FG	2009	16,0		40,0
16	Dajiedhi	BGS/CEAA	1998/2005			
17	Dedho	UAEH-CIA	2007			
18	El Arenal	GALLEGOS	1999			
19	El Arbolito	UAEH-CIA	2007			
20	El Boja	GALLEGOS	1999			
21	El Geiser	JIMENEZ	1997			
22	El Llano 2ª sección	JIMENEZ/BGS	1997/1998	35,0	NE	16,0
23	El Mexe	JIMENEZ/BGS	1997/1998	50,0	NE	55,0
24	El Olvera	CEAA	2008			
25	El Rincón de Tablón	BGS	1998			
26	El Salto	BGS	1998			
27	El Tinaco	GALLEGOS	1999			
28	Grande	JIMENEZ/BGS	1997/1998			
29	Héroes de Carranza	JIMENEZ	1997			
30	Itziculnquitapilco	BGS	1998			
31	La Amistad	JIMENEZ	1997			
32	La Estancia	BGS	1998	1,0	853	32
33	La Peña	CEAA	2008			
34	Mangas	BGS	1998	75,0	1 083	BROTANTE
35	Manzanitas	JIMENEZ	1997			
36	13 Mendoza	FG	2009	75,0		65,0
37	Michimaltongo	BGS	1998	22,0	4 400	47,0
38	Montecillos	BGS	1998	20,0	1 400	32,0
39	PEMEX 6	JIMENEZ	1997			
40	PEMEX 9	JIMENEZ	1997	150,0	0	15,0
41	Progreso	FG	2009			
42	San Francisco Bojay	BGS/GALLEGOS	1998/1999	58,0	6 000	16,0
43	San Isidro	CEAA/UAEH-CIA	2008/2007			
44	San José Bojay	BGS/JIMENEZ/GALLEGOS	1998/1999/1999	100,0		
45	San Marcos	JIMENEZ	1997			
46	San Salvador	JIMENEZ/CEAA/UAEH-CIA	1999/2008/2007	20,0	4 000	BROTANTE
47	93 San Salvador	FG	2009	150,0	7 500	20,0

NP	Nombre del Pozo	Fuente	Año	Gasto (lps)	Abastece (hab)	Nivel Estático (m)
48	Santa María	CEAA/UAEH-CIA	2008/2007			
49	Sta María Amajac	JIMENEZ/CEAA	1997/2008			
50	Sistema San Gabriel	JIMENEZ	1997			
51	9 Teocalco	JIMENEZ	1999		130	
52	Teofani	JIMENEZ	1997			
53	Tepatepec	BGS	1998			
54	Tepeji del Río	BGS	1998	5,0	5 402	6,0
55	Tetepango	BGS	1998	14,0	25 163	19,0
56	Tezontepec	JIMENEZ	1997	600,0		
57	Tlalminulpa	JIMENEZ	1997	10,0	1 600	9,0
58	Tlaxcoapan	JIMENEZ/UAEH-CIA/CEAA	1999/2007/2008	17,0	10 237	55,0
59	Tula	BGS/GALLEGOS	1998/1999			
60	Xochitan	BGS	1998	43,0	NE	100,0

NE No especificado

Tabla 12. Calidad Físico Química de algunos pozos en el Valle del Mezquital

Nombre del Pozo	Alcalinidad Total mg/L	Conductividad μ S/cm	pH	SDT mg/L	SST mg/L	Sólidos totales mg/L	Temperatura °C	Turbiedad UTN
Actopan				1 923,0	6,2	1 932,0		
Adelaido Azpeitia		1 055,0	7,08	1 300,0				
Ajacuba		1 350,0	7,26				27,1	
Atitalaquia		1 850,0	7,50				25,3	
Atotonilco		1 593,0	7,30				21,9	
Benito Juárez		1 423,0	7,20				28,9	
Bothibaji		1 370,0	6,70	92,0		1 068,0	23,8	0,36
Boxani		1 170,0	7,30				26,1	
Cañada Chica								
Caxuxi		2 850,0	7,30				21,5	
CFE Teocalco		2 246,0	7,40				21,0	
CFE Tlaxcoapan		1 960,0	7,35				23,0	
Chicavasco		2 270,0	6,76			1 553,0	19,5	
Col. Veracruz		1 470,0	6,88				26,0	0,118
Col. Veracruz 2	487,0	1 541,0	7,30	1,010,0		1 037,0	26,8	0,12
Dajiedhi		835,3	7,15			605,0	25,3	0,24
Dedho			7,40	64,87				
El Arrenal				1 066,0	0,0	1 066,0		
El Arbolito			7,50	108,0				0,01
El Boja		2 740,0	7,10				25,2	
El Geiser								
El Llano 2ª sección		940,0	7,00				23,0	
El Mexe		2 867,0	7,00				20,3	
El Olvera		943,0	6,99	1,154,0				
El Rincón de Tablón		236,0	8,10				23,8	
El Salto		693,0	7,50				23,8	
El Tinaco				1 205,7	9,3	1 215,0		
Grande		2 626,0	7,40				20,2	0,2
Héroes de Carranza								
Itziculquitapilco		525,0	7,00				27,6	
La Amistad								
La Estancia		746,0	7,40				25,2	
La Peña		824,0	6,68	1 130,3		565,0		0,27
Mangas		21,2	7,10				20,0	

Nombre del Pozo	Alcalinidad Total mg/L	Conductividad µS/cm	pH	SDT mg/L	SST mg/L	Sólidos totales mg/L	Temperatura °C	Turbiedad UTN
Manzanitas								
13 Mendoza	523,0		7,43	1 070,0	73,0	1 143,0		0,11
Michimaltongo	521,0		7,19	1 092,0	18,0	1 110,0		0,105
Montecillos		690,0	6,90				27,0	
PEMEX 6		1 167,0	7,20				20,0	
PEMEX 9								
Progreso		1 643,0	7,40				19,0	
San Francisco Bojay		1 603,0	7,00				22,0	
San Isidro		1 985,0	6,48	1 543,28				
San José Bojay		1 800,0	7,40	1 109,0	6,83	1 116,0	21,3	
San Marcos								
San Salvador	513,0	2 013,0	7,69	1 159,0	5,5	1 164,5	21,1	1,6
93 San Salvador	580,0		7,14	1 266,0	14,0	1 280,0		0,092
Santa María		1 320,0	7,70	1 755,13				
Sta María Amajac		1 640,0	7,26					
Sistema San Gabriel								
9 Teocalco	520,0	1 663,0		1 046,0	38,0	1 084,0		1,0
Teofani								
Tepatepec		1 806,0	7,20				22,5	
Tepeji del Río		1 200,0	7,50				22,2	
Tetepango		412,0	7,00				23,4	
Tezontepec	511,0	1 783,0		1 159,0	33,0	1 192,0		1,0
Tlalminulpa		2 266,0	7,30				21,7	
Tlaxcoapan		1 494,0	7,30				22,2	
Tula		608,0	6,60	1 445,0	55,0	1 450,5		
Xochitan		1 677,0	7,40				25,9	

Tabla 13. Parámetros inorgánicos de algunos pozos en el Valle del Mezquital

Nombre del Pozo	Acidez mg/L	Bicarbonatos (HCO ₃) mg/L	Carbonatos (CO ₃) mg/L	Cianuros (CN) mg/L	Cloro Libre mg/L	Cloruros (Cl) mg/L	DQO _s mg/L	DQO _t mg/L	Dureza Total (CaCO ₃) mg/L
Actopan									
Adelaido Azpeitia				0,002		275			43
Ajacuba	22,0	561,0	<0,04			60,8			
Atitalaquia	23,0	445,0	<0,05			141,6			
Atotonilco	51,0	448,0	<0,04			86,2		6	
Benito Juárez	16,0	428,0	14,0			153,5			
Bothibaji	30,0	367,0	<0,04			179,7			483
Boxani	<4,573	646,0	53,0			17,4			
Cañada Chica									
Caxuxi	20,0	536,0	<0,04			458,1		28	
CFE Teocalco	67,0	405,0	<0,04			110,5			
CFE Tlaxcoapan	32,0	630,0	<0,04			227,8			
Chicavasco	89,0	696,0	<0,04			288,8			530,83
Col. Veracruz	103,0	494,0	0,0	0,02		120,7		5,2	404
Col. Veracruz 2	103,0	494,0	0,0	0,02	0,0	176,0		5,2	404
Dajiedhi	15,0	316,0	<0,04			45,7			269
Dedho									20,17
El Arenal									
El Arbolito						186,66			136,48
El Boja									
El Geiser									

Nombre del Pozo	Acidez	Bicarbonatos (HCO ₃)	Carbonatos (CO ₃)	Cianuros (CN)	Cloro Libre	Cloruros (Cl)	DQO _s	DQO _t	Dureza Total (CaCO ₃)
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
El Llano 2ª sección									
El Mexe	18,0	302,0	<5,125			104,5		5,0	
El Olvera				0,003		269,0			65,0
El Rincón de Tablón									
El Salto	16,0	366,0	<5,125			20,5			
El Tinaco									
Grande	58,0	789,0	<0,04			291,6		17,0	156,76
Héroes de Carranza								56,0	
Itziculquitapilco	16,0	269,0	<0,03			20,4			
La Amistad								150,0	
La Estancia	24,0	407,0	<0,04			7,6			
La Peña						134,4			246,67
Mangas	28,0	770,0	<0,04			219,0			
Manzanitas								4,0	
13 Mendoza		460,0	63,0	0,02	0,1	181,0		6,4	458,0
Michimaltongo	21,0	189,0	0,0			13,2			
Montecillos	32,0	402,0	<0,04			59,5			
PEMEX 6								48,0	
PEMEX 9	48,0	534,0	<0,04		0,1	175,0			
Progreso		462,0	59,0	0,02	2,0	145,0		6,8	376,0
San Francisco Bojay	30,0	360,0	<0,04	128,8					
San Isidro				0,002		284,81			691,96
San José Bojay	40,0	503,0	<0,03			232,2			
San Marcos								37,0	
San Salvador		572,0		0,008	0,1	327,42	12,0	13,86	492,0
93 San Salvador		525,0	55,0	0,02	0,0	234,0		7,2	396,0
Santa María						270,23			502,14
Sta María Amajac				0,003		205,0		4,0	71,0
Sistema San Gabriel								7,0	
9 Teocalco		586,0	1,0	0,08	0,1	148,8	7,056	7,7	324,25-520,5
Teofani								9,0	
Tepatepec	38,0	542,0	<9,025			228,8			
Tepeji del Río	35,0	209,0	<0,04			14,9			
Tetepango	24,0	420,0	<0,04			124,1			
Tezontepec		542,0	12,0	0,006	0,1	179,0	7,3	8,12	452,0-511,0
Tlalminulpa	61,0	664,0	29,0			278,6			
Tlaxcoapan	38,0	492,0	<0,04			292,6			
Tula	20,0	259,0	<0,04			16,3			
Xochitan	<15,57	493,0	<12,925			184,5			

Tabla 14. Parámetros inorgánicos de algunos pozos en el Valle del Mezquital (continuación)

Nombre del Pozo	Fosfatos Totales (PO ₄)	Fósforo	Nitratos (N-NO ₃)	Nitritos (N-NO ₂)	Nitrógeno Amoniacal (N-NH ₃)	Nitrógeno Total	Orto-Fosfatos (o-PO ₄)	Oxígeno Disuelto (OD)
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Actopan		0,1896	17,55	0,121			0,0325	
Adelaido Azpeitia			0,8	0,004				
Ajacuba	0,02	<0,5	4,0	0,01	<0,001		0,016	2,6
Atitalaquía	0,06	<0,5	6,0	<0,001	<0,001		0,035	2,3
Atotonilco	0,04	<0,5	3,2	<0,006	<0,001		0,028	2,6
Benito Juárez	0,17	<0,5	6,3	<0,004	<0,001		0,136	2,5
Bothibaji	0,10	<0,5	14,5	<0,005	<0,001		0,093	2,8

Nombre del Pozo	Fosfatos Totales (PO ₄)	Fósforo	Nitratos (N-NO ₃)	Nitritos (N-NO ₂)	Nitrógeno Amoniacal (N-NH ₃)	Nitrógeno Total	Orto-Fosfatos (o-PO ₄)	Oxígeno Disuelto (OD)
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Boxani	0,04	<0,5	<1,31	<0,002	<0,001		0,032	2,0
Cañada Chica								
Caxuxi	0,06	<0,5	18,8	<0,008	<0,001		0,046	2,4
CFE Teocalco	0,06	<0,5	6,0	<0,005	<0,001		0,097	2,4
CFE Tlaxcoapan	0,03	<0,5	13,0	<0,006	<0,001		0,009	2,2
Chicavasco	0,08	<0,5	12,3	<0,006	<0,001		0,066	2,1
Col. Veracruz	0,29	<0,5	5,6	<0,003	<0,001		0,199	4,3
Col. Veracruz 2	0,29	<0,5	5,6	0,003	<0,001		0,199	4,3
Dajiedhi	0,09	<0,5	7,4	<0,005	<0,001		0,079	2,8
Dedho								
El Arenal								
El Arbolito					0,1			
El Boja			17,8					
El Geíser								
El Llano 2ª sección			3,2					
El Mexe	0,12	<0,5	5,0	<0,005	<0,001		0,005	2,6
El Olvera			0,9	0,002				
El Rincón de Tablón			3,8					
El Salto	0,04	<0,5	3,0	<0,004	<0,001		0,285	2,8
El Tinaco		1,391	16,68	<0,001			0,862	
Grande	0,35	<0,5	16,6	<0,004	<0,001		0,335	1,9
Héroes de Carranza								
Itzicuinquitapilco	0,04	<0,5	3,5	<0,01	<0,001		0,04	2,0
La Amistad								
La Estancia	0,20	<0,5	8,0	<0,004	<0,001		0,138	2,8
La Peña			210,64	0,0046	0,3			
Mangas	0,84	0,9	14,4	<0,001	<0,001		1,277	2,3
Manzanitas								
13 Mendoza		1,74	14,04	0,01	0,1	14,04		6,8
Michimaltongo	0,05	<0,5	2,0	0,002	<0,001		0,001	3,9
Montecillos	0,16	<0,5	5,0	<0,006	<0,001		0,125	3,3
PEMEX 6								
PEMEX 9	0,05	<0,5	12,7	<0,004	<0,001		0,021	3,4
Progreso		1,74	16,11	0,1	0,1	24,5		5,35
San Francisco Bojay	0,12	<0,5	7,0	<0,005	<0,001		0,09	3,0
San Isidro				0,014	0,3			
San José Bojay	0,002	<0,5	14,2	<0,006-0,01	<0,001		0,002-0,006	3,3
San Marcos								
San Salvador		0,2	19,0	0,005	0,07			11,7
93 San Salvador		1,74	17,82	0,01	0,1	17,82		7,42
Santa María			205,38	0,002				
Sta María Amajac			2,5	0,0013				
Sistema San Gabriel								
9 Teocalco		0,12	24,0	0,008	0,69			5,2
Teofani								
Tepatepec	0,5	<0,5	10,2	<0,004	<0,001		0,045	2,7
Tepeji del Río	0,11	<0,5	1,0	<0,004	<0,001		1,384	2,8
Tetepango	0,05	<0,5	10,1	<0,006	<0,001		0,05	2,6
Tezontepec		0,196	18,0	0,006	0,08			8,4
Tlalminulpa	0,04	<0,5	12,2	<0,005	<0,001		0,02	2,6
Tlaxcoapan	0,04	<0,5	11,5	<0,006	<0,001		0,007	3,2
Tula	0,03	<0,5	3,75-9,0	<0,001	<0,001		<0,016-0,04	2,6
Xochitan	0,1	0,5	8,1	<0,004	<0,001		0,069	2,4

Tabla 15. Parámetros inorgánicos detectados en algunos pozos del Valle del Mezquital (continuación)

Nombre del Pozo	SAAM	Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	Sulfuros	Aluminio (Al)	Antimonio (Sb)	Arsénico (As)	Bario (Ba)	Berilio (Be)	Boro (B)
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Actopan									
Adelaido Azpeitia		270,0					1,40		
Ajacuba	0,045	88,5		<3,1	<0,04		0,04	<0,11	0,63
Atitalaquia	<0,001	393,2		<0,5	0,08		0,21	0,03	1,00
Atotonilco	<0,001	343,0		<1,0	0,12		0,03	<0,11	0,64
Benito Juárez	<0,023	119,1		6,7	0,08		0,06	<0,11	0,50
Bothibaji	0,076	112,9		<0,5	<0,05		0,13	<0,11	0,12
Boxani	<0,001	43,8		<2,5	<0,21		0,02	<0,11	0,35
Cañada Chica									
Caxuxi	<0,001	310,9		<0,4	<0,06		0,04	<0,35	0,15
CFE Teocalco	<0,034	667,0		<2,3	0,20		0,02	<0,11	0,99
CFE Tlaxcoapan	<0,001	195,0		<0,5	0,11		0,04	<0,16	1,09
Chicavasco	<0,082	174,0		<7,17	0,08		0,07	<0,02	0,70
Col. Veracruz	0,089	139,4	10,0	4,8	0,10	0,004	0,06	<0,02	0,42
Col. Veracruz 2	0,089	139,4	10,0	0,26	0,10	0,004	0,15	0,02	0,42
Dajiedhi	<0,023	77,0		2,6	<0,04		0,11	<0,11	0,09
Dedho		0,01							
El Arenal									
El Arbolito		18,65							
El Boja		272,0		<0,5	<0,08		<0,18	<0,16	0,30
El Geiser									
El Llano 2ª sección		1 055,90		<1,4	4,35		0,03	<0,21	1,4
El Mexe	<0,042	68,3		<25,7	0,11		32,11	<0,11	0,3
El Olvera		105,0				0,006	0,80		
El Rincón de Tablón		22,1		<2,07	0,10		0,01	<0,16	0,1
El Salto	<0,007	33,4		<1,14	0,17		0,06	<0,11	<0,2
El Tinaco									
Grande	<0,130	236,2		<1,64	<0,08		0,16	<0,14	1,70
Héroes de Carranza									
Itziculnquitapilco	<0,001	20,7		1,91	0,17			<0,30	0,07
La Amistad									
La Estancia	<0,023	30,0		<1,5	<0,04		0,1	<0,11	<0,13
La Peña		88,17				0,009	0,7		
Mangas	<0,001	138,6		<0,45	0,31		0,04	<0,16	1,80
Manzanitas									
13 Mendoza	0,10	101,41	10,0	0,028		0,002	0,136	0,315	
Michimaltongo	0,089	104,0		20,70	0,09		0,04	<0,02	0,04
Montecillos	<0,034	165,0		<1,46	1,16		0,08	<0,11	<0,60
PEMEX 6									
PEMEX 9	<0,042	126,9		<1,28	0,07		0,11	<0,11	0,65
Progreso	0,10	106,64	10,0	0,046		ND	0,136		0,26
San Francisco Bojay	<0,06	388,0		<10,70	0,7		0,06	<0,11	0,82
San Isidro		387,5				0,005	0,70		
San José Bojay	<0,04	153,0		<0,45	0,06		0,29	<0,16	0,32
San Marcos									
San Salvador	0,60	225,0	1,7	0,07 - <2,0	0,09	0,002	0,10	<0,11	0,15
93 San Salvador	0,10	97,2	10,0	0,044		ND	0,096		ND
Santa María		126,6		0,402			1,60		
Sta María Amajac		42,5					0,90		
Sistema San Gabriel									
9 Teocalco	0,18	109,0	1,2	0,08		0,0	0,10		0,55
Teofani									

Nombre del Pozo	SAAM	Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	Sulfuros	Aluminio (Al)	Antimonio (Sb)	Arsénico (As)	Bario (Ba)	Berilio (Be)	Boro (B)
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Tepatepec	<0,042	150,0		<2,3	0,08		0,09	<0,11	0,78
Tepeji del Río	<0,001	18,9		<1,5	0,08		0,04	<0,11	0,55
Tetepango	<0,001	73,9		<0,5	0,22		0,33	<0,16	<0,2
Tezontepec	0,14	130,0	1,0	0,1		0,004	0,10	<0,11	0,63
Tlalminulpa	<0,03	213,4		<0,5	0,15		0,03	<0,11	<0,1
Tlaxcoapan	<0,001	60,6		<0,5	0,04		0,18	<0,11	<0,01
Tula	<0,001	60,0		<3,4	0,10		0,08	<0,11	<0,04
Xochitan	<0,042	135,3		<3,7	0,14		0,08	<0,11	<0,1

ND no detectado

Tabla 16. Parámetros inorgánicos detectados en algunos pozos del Valle del Mezquital (continuación)

Nombre del Pozo	Cadmio (Cd)	Calcio (Ca)	Cobalto (Co)	Cobre (Cu)	Cromo Total (Cr)	Fierro (Fe)	Fluoruros (F)	Magnesio (Mg)	Manganeso (Mn)
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Actopan									
Adelaido Azpeitia									
Ajacuba	0,61	49,0	0,05	3,04		<0,02	0,65	44,0	<0,05
Atitalaquia	<0,1	150,0	0,14	6,78	2,50	<0,01	1,40	50,0	<0,002
Atotonilco	0,07- <0,46	148,0	<0,14	1,48	2,00	<0,08	1,13	57,0	<0,052
Benito Juárez	0,21	19,0	<0,11	4,41		<0,04	0,85	30,0	<0,095
Bothibaji	<0,23	113,0	0,13	3,69		<0,01	0,21	38,0	<0,052
Boxani	<0,19	2,6	<0,08	3,26		<0,06	0,78	17,0	<0,097
Cañada Chica	ND			ND	0,02				
Caxuxi	<0,28	133,0	0,22	6,47		<0,01	0,32	40,0	<0,087
CFE Teocalco	<0,17	226,0	0,55	4,97		<0,03	1,04	84,0	<0,114
CFE Tlaxcoapan	<0,28	92,0	<0,23	5,68		<0,011	0,66	43,7	<0,076
Chicavasco	<0,21	165,0	<0,31	5,69		<0,017	0,08	54,2	<0,052
Col. Veracruz	<0,05	22,0	<0,07	5,96		<0,013	0,73	45,1	<0,002
Col. Veracruz 2	0,05	22,0	0,07	5,96		0,013	1,10	60,75	0,002
Dajjedhi	<0,19	41,0	<0,097	5,24		<0,052	0,35	41,7	<0,052
Dedho									
El Arenal	ND			0,01	0,01				
El Arbolito									
El Boja	<0,28	99,0	<0,22	6,33		<0,01	<0,17	85,2	<0,076
El Geiser									
El Llano 2ª sección	<0,37	414,0	0,70	6,00		<0,022	2,86	91,74	<0,09
El Mexe	<0,31	35,0	<0,17	5,80		<0,013	0,49	42,57	<0,05
El Olvera							0,02		
El Rincón de Tablón	<0,28	6,0	<0,2	8,4		<0,011	0,94	5,01	<0,07
El Salto	<0,28	31,0	<0,09	2,9	2,3	<0,001	0,47	27,65	<0,05
El Tinaco									
Grande	<0,21	122,0	0,86	8,1		<0,011	0,3	60,25	<0,068
Héroes de Carranza								23,15	<0,74
Itziculquitapilco	<0,46	24,0	<0,2	6,7		<0,011	0,38		
La Amistad									
La Estancia	<0,22	61,0	<0,11	5,6		<0,045	0,49	45,51	<0,05
La Peña					0,0134	0,113	1,80		

Nombre del Pozo	Cadmio (Cd)	Calcio (Ca)	Cobalto (Co)	Cobre (Cu)	Cromo Total (Cr)	Fierro (Fe)	Fluoruros (F)	Magnesio (Mg)	Manganeso (Mn)
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Mangas	<0,28	59,0	0,37	7,2		<0,011	2,73	72,25	<0,07
Manzanitas									
13 Mendoza	ND		ND	ND	ND	ND	0,538	63,55	ND
Michimaltongo	0,05	38,0	0,04	1,6	1,7	0,05	1,62	13,7	<0,0001
Montecillos	<0,33	84,0	0,41	4,8	1,3	<0,0018	2,15	26,39	<0,05
PEMEX 6									
PEMEX 9	<0,34	95,0	0,3	4,8	1,8	<0,034	0,65	33,20	<0,05
Progreso	ND		ND	ND	ND	ND	1,022	30,92	ND
San Francisco Bojay	<0,22	113,0	0,36	3,8		<0,039	1,73	41,86	<0,19
San Isidro	0,00145			0,506	0,029	0,099	0,26		0,002
San José Bojay	<0,39	106,0	<0,265	6,4		<0,011	0,83	49,00	<0,08
San Marcos									
San Salvador	0,002- <0,21	110,0- 127,0	0,014- 0,23	0,11- 4,507	0,002- 0,004	<0,025- 0,09	0,092-0,31	46,76-53,00	0,004-<0,052
93 San Salvador	ND		ND	ND	ND	ND	0,359	38,2	ND
Santa María			0,0134		0,03	0,427	0,55		0,1
Sta María Amajac						0,12			
Sistema San Gabriel									
9 Teocalco		0,0	77,9	0,01	0,001	0,04	0,57	30,0	0,00
Teofani									
Tepatepec	<0,25	72,0	<0,24	6,04		<0,025	0,55	71,0	<0,052
Tepeji del Rfo	<0,19	28,0	0,08	13,31		<0,011	0,20	14,0	<0,0132
Tetepango	<0,28	122,0	<0,16	2,29		<0,011	0,47	33,0	<0,076
Tezontepec	0,001	73,0	0,01	0,02	0,001	0,16	1,06	64,0	0,01
Tlalminulpa	<0,23	109,0	0,26	6,28		<0,069	1,01	51,0	<0,052
Tlaxcoapan	<0,29	108,0	0,26	4,51		<0,011	0,40	40,0	<0,052
Tula	<0,19	47,0	0,07	5,4		<0,011	0,70	20,0	<0,052
Xochitan	<0,26	18,0	0,09	5,4		0,018	0,86	20,0	<0,052

ND no detectado

Tabla 17. Parámetros inorgánicos detectados en algunos pozos del Valle del Mezquital (continuación)

Nombre del Pozo	Mercurio (Hg)	Molibdeno (Mo)	Níquel (Ni)	Plata (Ag)	Plomo (Pb)	Potasio (K)	Sodio (Na)	Selenio (Se)	Silicio (Si)	Talio (Ti)	Yodo (I)	Zinc (Zn)
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Actopan												
Adelaido Azpeitia											0,04	
Ajacuba		1,90	0,91		0,035	22,0	126,9		44,0	<0,02	<0,13	<2,44
Atitalaquia		1,90	2,00		0,24	26,0	189,6		32,0	<0,03	0,04	<1,27
Atotonilco		4,40	1,37		0,29	37,0	127,7		36,0	<0,02	<0,13	<3,16
Benito Juárez		3,10	0,49		0,86	31,0	229,0		32,0	0,03	<0,22	<6,76
Bothibaji		1,50	1,23		0,42	17,0	107,0		27,0	<0,02	<0,13	5,66
Boxani		10,00	<0,21		<0,34	6,3	249,5		24,0	<0,02	<0,13	<1,01
Cañada Chica					0,10							0,01
Caxuxi		3,90	1,45		1,21	44,0	401,0		24,0	0,04	<0,16	<2,9
CFE Teocalco		3,10	5,96		<0,67	29,0	124,1		33,0	<0,06	<0,15	3,3
CFE Tlaxcoapan		2,16	1,31		<0,43	28,0	278,0		32,0	<0,03	<0,18	<0,9
Chicavasco		0,51	2,47		<0,66	31,0	234,9		29,0	<0,03	<0,13	<1,8
Col. Veracruz	ND	2,68	0,71		<0,24	17,0	209,0		37,0	<0,01	<0,06	2,7
Col. Veracruz 2	ND	2,68	0,71		<0,24	17,0	352,0		37,0	0,01	0,06	2,7

Nombre del Pozo	Mercurio (Hg)	Molibdeno (Mo)	Níquel (Ni)	Plata (Ag)	Plomo (Pb)	Potasio (K)	Sodio (Na)	Selenio (Se)	Silicio (Si)	Talio (Ti)	Yodo (I)	Zinc (Zn)
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Dajiedhi		2,07	<0,69		<0,30	11,0	61,4		26,0	<0,02	<0,13	<2,23
Dedho							168,23					
El Arenal					ND							0,01
El Arbolito							167,54					
El Boja		3,00	1,67		<0,54	45,0	277,1		26,0	<0,02	<0,17	<0,88
El Geiser												
El Llano 2ª sección		6,02	22,08		1,15	30,8	131,0		20,2	2,86	<0,17	3,9
El Mexe		3,11	1,23		0,41	24,0	86,4		32,0	<0,27	<0,15	6,5
El Olvera											0,17	
El Rincón de Tablón		<4,80	<0,305		0,47	0,89	109,0		15,0	<0,03	<0,30	<5,1
El Salto		6,48	0,7		<0,24	17,7	84,4		35,0	<0,05	<0,13	7,4
El Tinaco												
Grande		5,99	3,91		<0,62	13,1	344,1		30,0	0,53	<0,14	<1,7
Héroes de Carranza		2,72	1,06		0,23	11,2	49,5		33,0	<0,02	<0,30	7,4
Izticulnquitapilco												
La Amistad												
La Estancia		0,76	0,93		0,47	1,9	27,0		30,0	<0,02	<0,13	32,0
La Peña					0,0075		42,89					0,017
Mangas		8,28	3,78		0,82	31,0	316,1		36,0	<0,03	<0,03	<0,87
Manzanitas												
13 Mendoza	ND				ND		344,0					ND
Michimaltongo		1,00	0,7		<0,24	19,0	55,4		38,0	<0,01	<0,06	2,5
Montecillos		9,02	3,0		<0,24	31,0	118,2		31,0	<0,06	<0,14	<5,3
PEMEX 6												
PEMEX 9		2,23	2,6		0,44	37,7	196,0		30,0	<0,004	<0,13	<3,4
Progreso	ND				ND		430,0					ND
San Francisco Bojay		5,42	2,55		0,28	30,7	141,5		34,0	0,05	<0,14	2,5
San Isidro					0,66		147,08					
San José Bojay		2,46	1,78		0,7	18,4	183,9		30,0	<0,02	<0,18	<0,9
San Marcos												
San Salvador	0,0004	1,87	0,01-1,817	0,005	0,014-0,63	26,8	214,0	0,0	27,0	<0,02	<0,13	<0,8
93 San Salvador	ND				ND		505,5					ND
Santa María					0,0128		200,33					0,28
Sta María Amajac												0,085
Sistema San Gabriel												
9 Teocalco	0		0,02	0,0	0,02	32,0	176,0	0,0				0,04
Teofani												
Tepatepec		3,09	2,17		0,76	49,0	186,8		32,0	0,04	<0,13	<2,67
Tepeji del Río	0,1	0,72	1,30		<0,22	11,0	32,2		41,0	<0,06	<0,13	14,16
Tetepango		1,40	1,68		0,53	17,0	75,9		32,0	<0,03	<0,03	<2,45
Tezontepec	0,01	0,001	0,01		0,02	31,0	168,0	0,001				0,05
Tlalminulpa		3,89	1,93		0,64	46,0	316,6		28,0	<0,02	<0,13	<15,29
Tlaxcoapan		2,04	1,46		<0,054	36,0	198,5		31,0	<0,02	<0,13	<0,91
Tula	0,1	2,20	1,11		<0,02	16,0	39,0		34,0	<0,03	<0,13	2,70
Xochitan		1,71	0,64		<0,45	15,7	290,6		33,0	0,03	<0,13	<2,85

ND no detectado

Tabla 18. Parámetros microbiológicos analizados en algunos pozos del Valle del Mezquital

Nombre del Pozo	Coliformes fecales. E. Coli. Organismos Termotolerantes	Coliformes totales	Huevos de Helmintos	Salmonella (3 variedades)	Shigella	Vibrio Cholerae	Virus entéricos
	NMP/100mL	NMP/100mL	HH/L	NMP/100mL	NMP/100mL	NMP/100mL	UFP/100mL
Actopan	<3,0 – 956,0	<3,0 – 2 400,0		ND	ND	ND	
Adelaido Azpeitia	<1,0	<1,0					
Ajacuba	0,0	12 450,0					
Atitalaquia	92,0	220,0					
Atotonilco	0,0	42,0					
Benito Juárez	0,0	21,0					
Bothibaji	0,0	40,0	ND				ND
Boxani	0,0	128,0					
Caxuxi	56,0	28 500,0					
CFE Teocalco	0,0	4200,					
CFE Tlaxcoapan	0,0	4,0					
Chicavasco	18,0	863,0					
Col. Veracruz	0,0	0,0	0,0	ND			
Col. Veracruz 2	<1,0	<1,0	<1,0	ND			
Dajiedhi	0,0	25,0					
El Arenal	ND	ND		ND	ND	ND	
El Arbolito							
El Boja	44,0	82,5					
El Geiser	0,93		ND		ND		
El Llano 2ª sección	2,0	27,0	ND				ND
El Mexe	0,0	2,0					
El Olvera	1,0	1,0					
El Rincón de Tablón	0,0	57,0					
El Salto	11,0	45,0					
El Tinaco		ND		ND	ND		ND
Grande	ND	0,0	ND				
Itzicuinquitapilco	0,0	0,0					
La Estancia	31,0	208,0					
La Peña	1,0	1,0					
Mangas	272,0	12 800,0					
13 Mendoza	<1,0	5,0	<1,0	ND			
Michimaltongo	0,0	0,0					
Montecillos	0,0	1,0					
PEMEX 9	45,0	1 010,0					
Progreso	<1,0	<1,0	<1,0	ND			
San Francisco Bojay	0,0 - 4,0	285,0				ND	ND
San Isidro	2,0	2,0					
San José Bojay	<3,0 – 93,0	3 878,0		ND	ND	ND	
San Salvador	<30 – 88,0	<3,0 – 700,0	0,002	ND	ND	ND	ND
93 San Salvador	<1,0	<1,0	<1,0	ND			
Santa María	2,0	8,0					
Sta María Amajac		1,0					
9 Teocalco	1,3	16,0	0,0				
Tepatepec	0,0	71,0					
Tepeji del Río	8,0	118,0					
Tetepango	2,0	127,0					
Tezontepec	4,2	27,0			0,002		
Tlalminulpa	13,0	70,0					
Tlaxcoapan	0,0	5,0					
Tula	<3,0 – 2 400,0	<3,0 – 2 400,0		ND	ND	ND	

ND no detectado

Tabla 19. Compuestos orgánicos identificados en algunos pozos del Valle del Mezquital

Nombre del Pozo	Benceno µg/L	Carbono orgánico disuelto (COD) mg/L	Carbono orgánico total (COT) mg/L	Etilbenceno µg/L	Fenoles mg/L	Hexaclorobenceno µg/L	Tolueno µg/L	Xileno (Tres isómeros) µg/L
Atitalaquia	0,0							
Atotonilco	0,1							
Col. Veracruz 2	ND			ND	0,01	ND	ND	ND
La Peña							2,07	
13 Mendoza	ND			ND	0,01	ND	ND	ND
PEMEX 9	ND			ND		ND	16,70	
Progreso	ND			ND	0,01	ND	ND	ND
San Isidro							16,74	
San José Bojay							20,40	
San Marcos							2,00	
San Salvador	ND	<4,181	5,3	ND		ND		
93 San Salvador	ND			ND	0,01	ND	ND	ND
Santa María							1,99	
9 Teocalco	ND		18,1	ND		ND		
Tepeji del Río	0,1							
Tezontepec	ND		28,2	ND		ND		

ND no detectado

Tabla 20. Radiactividad medida como Uranio en algunos pozos del Valle del Mezquital

Nombre del Pozo	Uranio µg/L	Nombre del Pozo	Uranio µg/L	Nombre del Pozo	Uranio µg/L
Ajacuba	1,7	Dajjedhi	1,4	San Salvador	17,5
Benito Juárez	3,2	El Boja	39,8	Tepatepec	19,7
Bothibaji	8,5	El Mexe	2,3	Tetepango	5,3
Boxani	4,587	Grande	25,5	Tezontepec	ND
Caxuxi	11,3	Itzicuinquitapilco	0,7	Tlalminulpa	29,2
Chicavasco	37,7	La Estancia	1,3	Tlaxcoapan	13,2
Col. Veracruz	4,5	Mangas	10,9	Xochitan	5,4

ND no detectado

Tabla 21. Trihalometanos y subproductos de desinfección medidos en algunos pozos del Valle del Mezquital

Nombre del Pozo	2,4,6-Triclorofenol µg/L	Bromoformo mg/L	Cloroformo mg/L	Dibromoclorometano mg/L	Trihalometanos Totales mg/L
Atitalaquia		0,10	141,8		
Atotonilco		0,50	86,2		
Col. Veracruz 2					ND
13 Mendoza					ND
PEMEX 9					ND
Progreso					ND
San Isidro		0,0335			
San Salvador	2,5	1,25	1,25	1,25	ND
93 San Salvador					ND
9 Teocalco					ND
Tepeji del Río		0,20	14,9		
Tezontepec	2,0	0,001	0,001	1,00	ND
Tlaxcoapan	2,5	1,25	1,25	1,25	ND
Xochitan					ND

ND no detectado

Tabla 22. Plaguicidas y herbicidas determinados en algunos pozos del Valle del Mezquital

Parámetros	Unidad	Atitalaquia	Atotonilco	Col. Veracruz	13 Mendoza	PEMEX 9	Progreso
2,4,D	µg/L			ND	ND		ND
Aldrin	µg/L			ND	ND	ND	ND
Bolstar	µg/L	1,0	0,6				
Clordano	µg/L			ND	ND	ND	ND
Cloropirifos	µg/L	0,1	0,1				
Dieldrin	µg/L			ND	ND	ND	ND
DDT (total de isómeros)	µg/L			ND	ND	ND	ND
Heptacloro	µg/L			ND	ND	ND	ND
Lindano	µg/L			ND	ND	ND	ND
Metoxicloro	µg/L			ND			

ND no detectado

Tabla 23. Plaguicidas y herbicidas determinados en algunos pozos del Valle del Mezquital (continuación)

Parámetros	Unidad	San Salvador	93 San Salvador	9 Teocalco	Tepeji del Río	Tezontepec
2,4,D	µg/L	ND	ND			ND
Aldrin	µg/L	0,0003	ND	ND		0,00025
Bolstar	µg/L	1,00			0,60	1,00
Clordano	µg/L	0,0003	ND	ND		0,00025
Cloropirifos	µg/L	0,75			0,10	0,60
Cumafos	µg/L	5,00				3,75
Demetos	µg/L	1,00				0,75
Diazinon	µg/L	2,00				1,50
Diclorvos	µg/L	0,25				0,20
Dieldrin	µg/L	0,0003	ND	ND		0,0002
DDT (total de isómeros)	µg/L		ND	ND		ND
Dimetoato	µg/L	4,00				4,00
Disulfoton	µg/L	0,67				0,50
Endhín aldehído	µg/L	0,0003				0,0002
Endosulfan I	µg/L	0,0003				0,0002
Endosulfan II	µg/L	0,0003				0,0002
Endosulfan sulfato	µg/L	0,0003				0,00025
Endrín	µg/L	0,0003				0,0002
Endrín cetona	µg/L	0,001				0,001
EPN	µg/L	1,65				1,65
Etil paration	µg/L	1,05				1,05
Etoprop	µg/L	3,00				3,00
Fensulfothion	µg/L	5,00				3,75
Fenthion	µg/L	0,33				0,25
Forade	µg/L	2,00				2,00
Heptacloro	µg/L	0,0003	ND	ND		0,0002
Heptacloro epóxido	µg/L	0,0003	ND			0,017
Lindano	µg/L	0,0003	ND	ND		0,0002
Malation	µg/L	1,05				1,05
Merfos	µg/L	3,00				3,00
Metilazinfos	µg/L	15,00				15,00
Metilparation	µg/L	0,75				0,60

Parámetros	Unidad	San Salvador	93 San Salvador	9 Teocalco	Tepeji del Río	Tezontepec
Metoxicloro	µg/L					
Mevinfos	µg/L	3,00				3,00
Monocrotos	µg/L	4,00				4,00
Neled	µg/L	1,00				1,00
Pentaclorofenol	µg/L	2,50				2,00
Ronnel	µg/L	3,00				3,00
Sitirofos	µg/L	50,00				50,00
Sulfotep	µg/L	1,05				1,05
Tepp	µg/L	10,00				10,00
Tokution	µg/L	1,25				1,00
Toxafeno	µg/L	0,003				0,0002
Tricloronato	µg/L	0,50				0,40

ND no detectado

Tabla 24. Otros parámetros determinados en algunos pozos del Valle del Mezquital

Nombre del Pozo	Color	DBO _{5s}	DBO _{5t}	Dióxido de carbono (CO ₂)	Hidróxidos	Potencial redox
	Pt/Co	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Bothibaji	5,0					
Col. Veracruz	2,5		11,0		0,0	
Dedho	0,019					
13 Mendoza	2,5		12,0		0,0	
Progreso	2,5		10,0		0,0	
San Marcos	5,0	3,0	5,02	165,0		-51,5
San Salvador	2,5		11,0		0,0	
9 Teocalco	4,0	3,1	3,3	177,0		-51,0
Tetepango	5,0	3,0	22,9	106,0		-43,7
Tlalminulpa	5,0	3,0	5,02	165,0		-51,5

Anexo B: Análisis de frecuencias de los datos recopilados

Dada la variabilidad de los valores reportados se efectuó un análisis de frecuencias eliminando aquellos valores extremos que sean discrepantes con los valores promedio, es decir, aquellos picos que se presenten en una sola ocasión y que generen una variabilidad mayor a la media. Dicho análisis se realizó para los parámetros considerados como definitorios en la elección de un sistema de tratamiento.

En cada figura se incluye el valor objetivo para un óptimo tratamiento así como el límite máximo permisible por la norma NOM-127-SSA1-1994 (NOM 127) y en su caso por el PROY-NOM-250-SSA1-2007 (NOM 250).

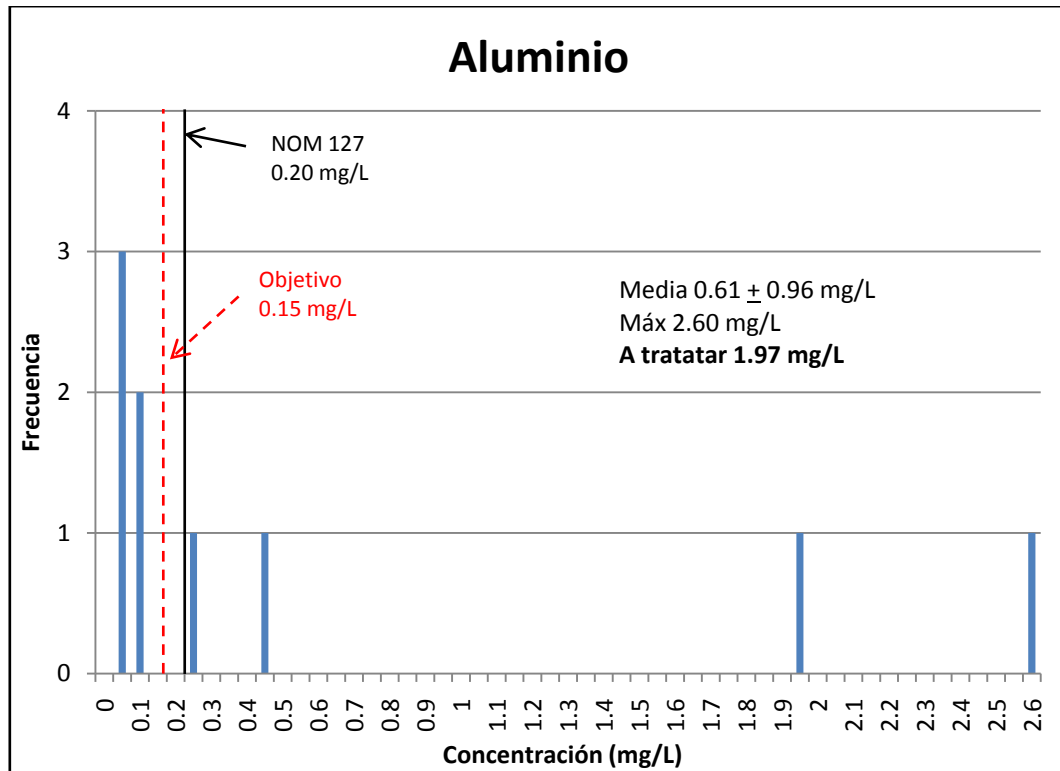


Figura 14. Frecuencia de datos para Aluminio

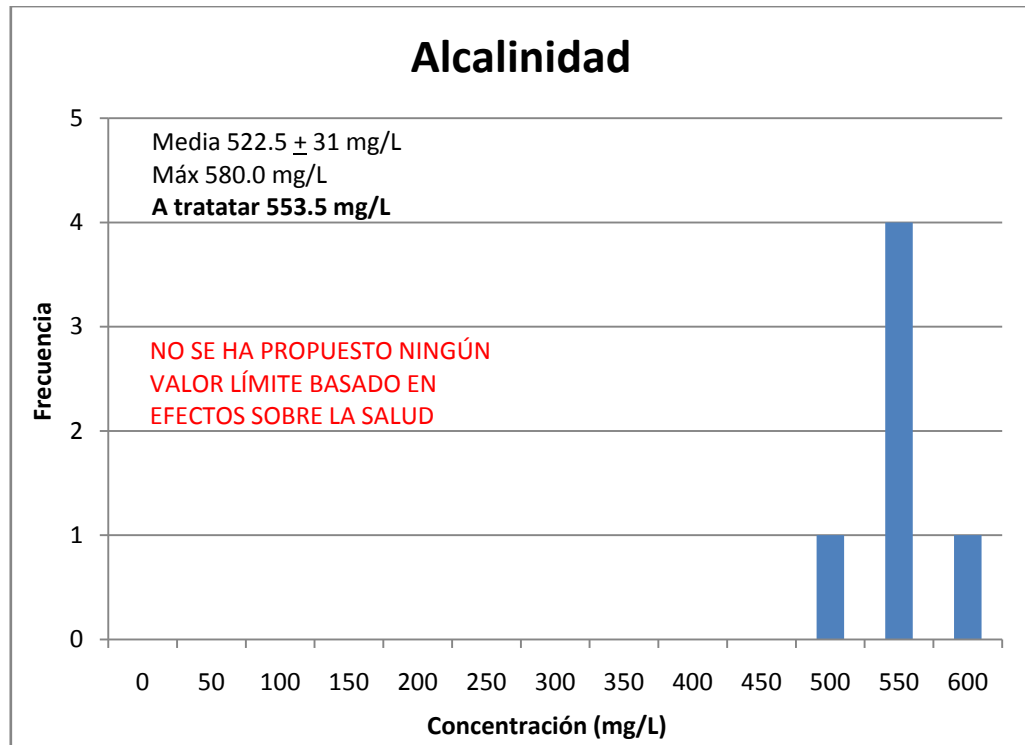


Figura 15. Frecuencia de datos para Alcalinidad

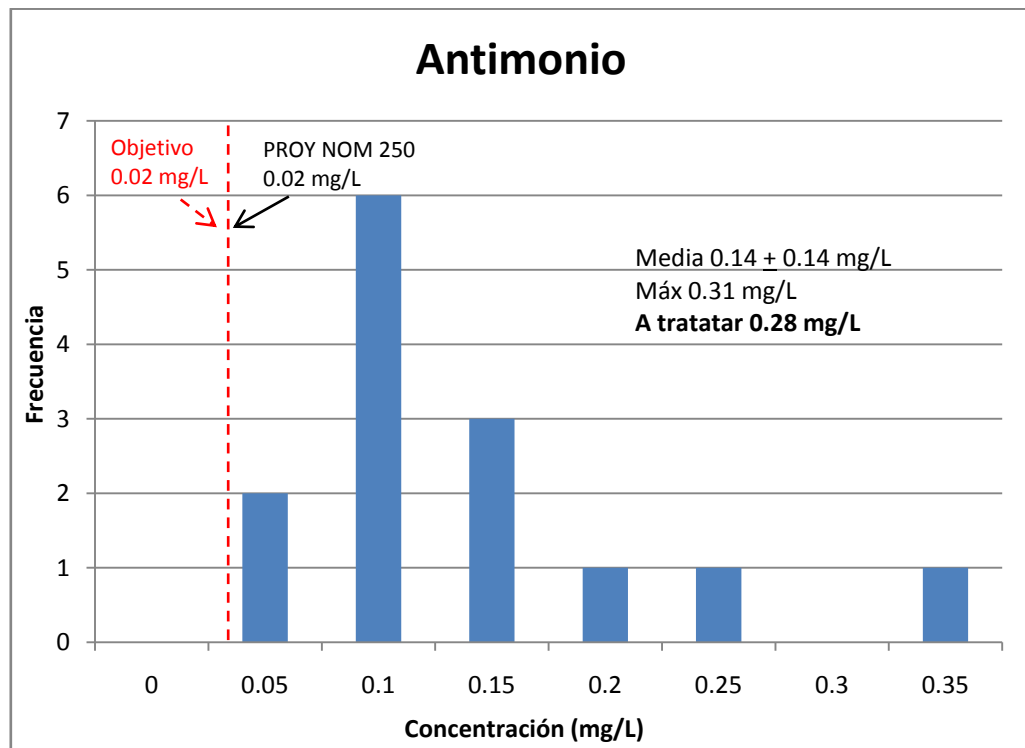


Figura 16. Frecuencia de datos para Antimonio

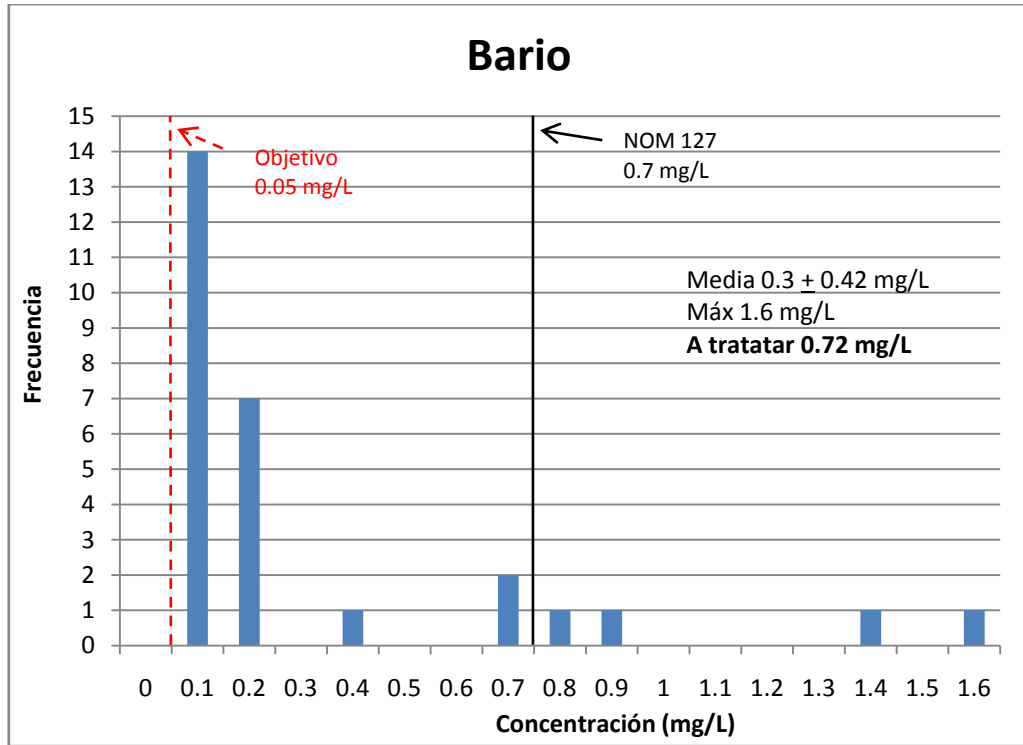


Figura 17. Frecuencia de datos para Bario

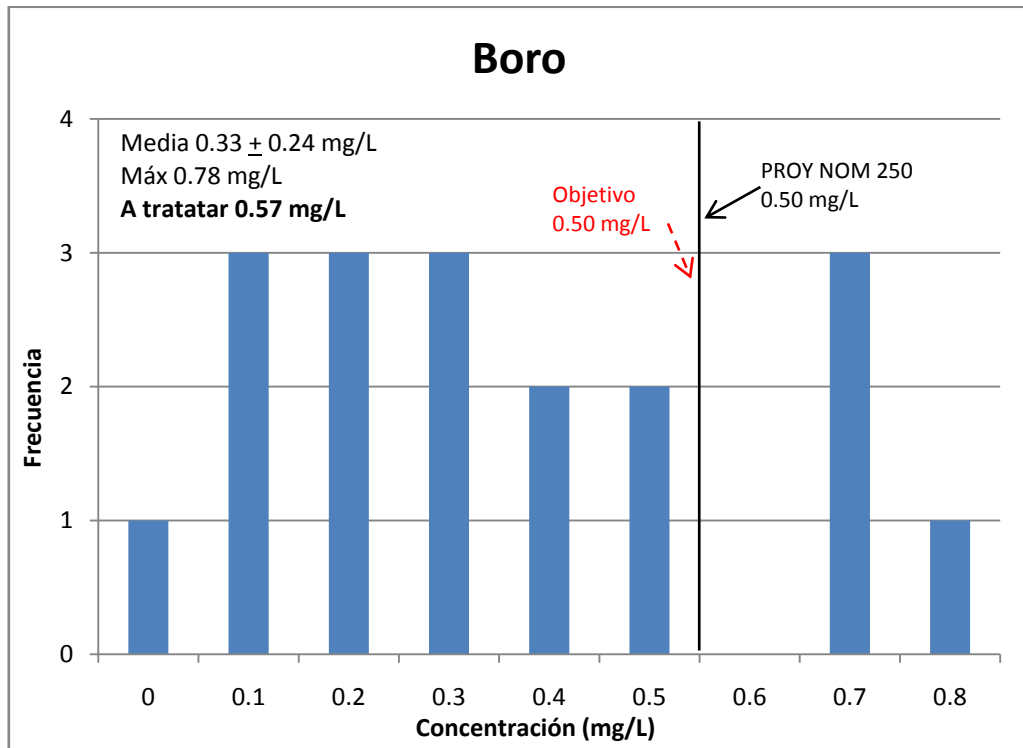


Figura 18. Frecuencia de datos para Boro

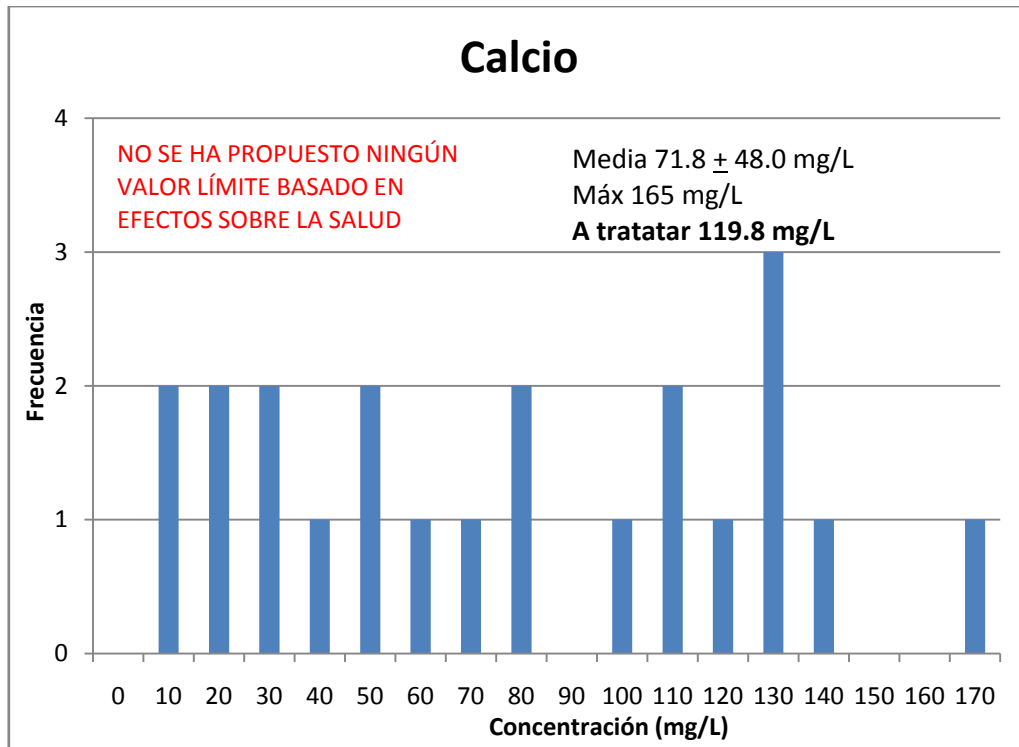


Figura 19. Frecuencia de datos para Calcio

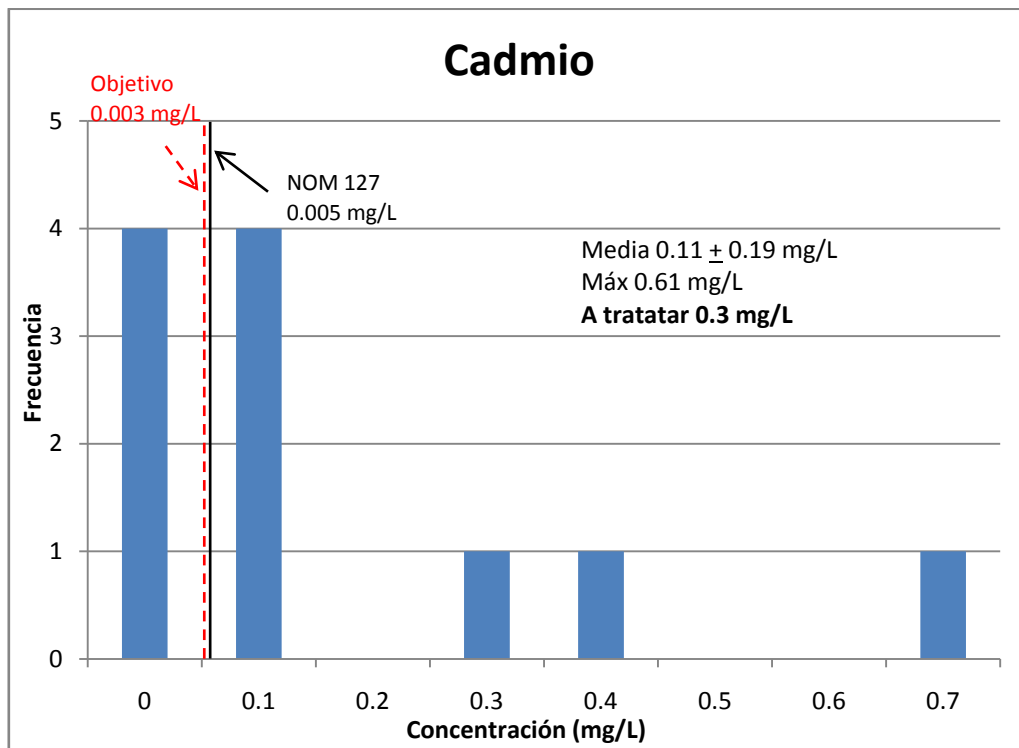


Figura 20. Frecuencia de datos para Cadmio

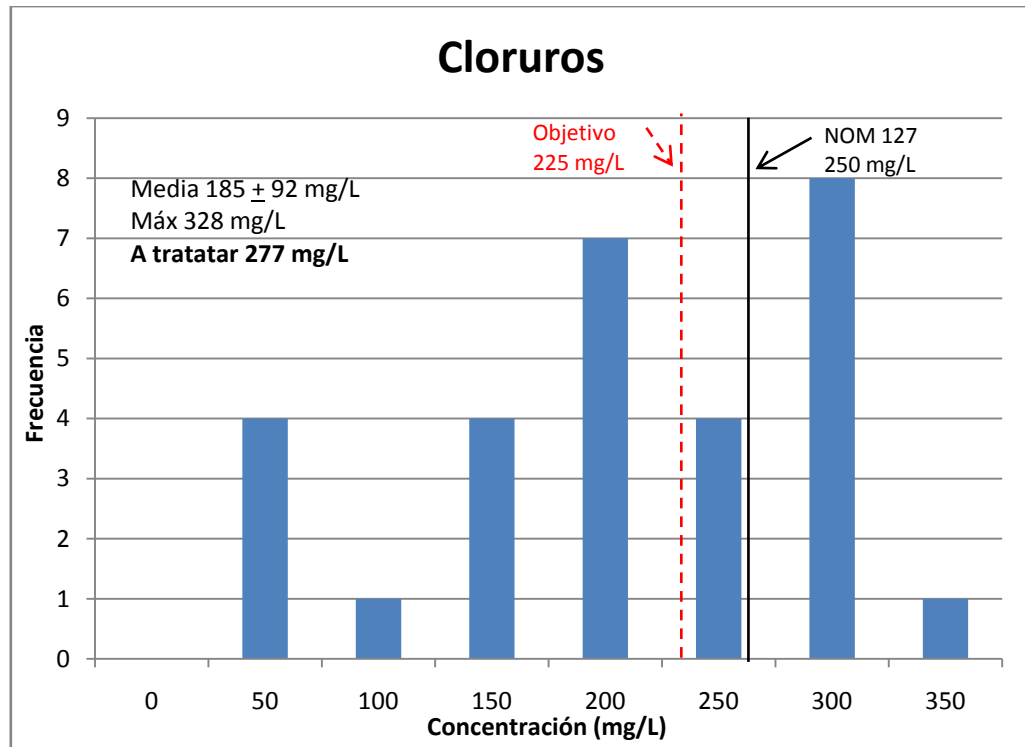


Figura 21. Frecuencia de datos para Cloruros

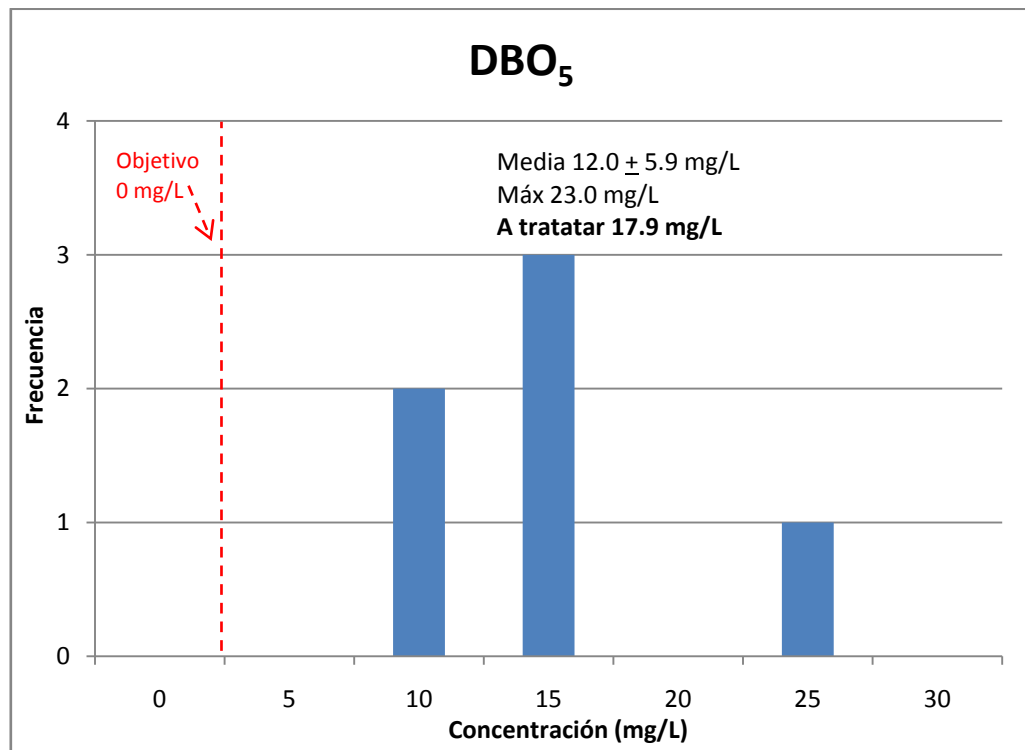


Figura 22. Frecuencia de datos para Demanda Bioquímica de Oxígeno

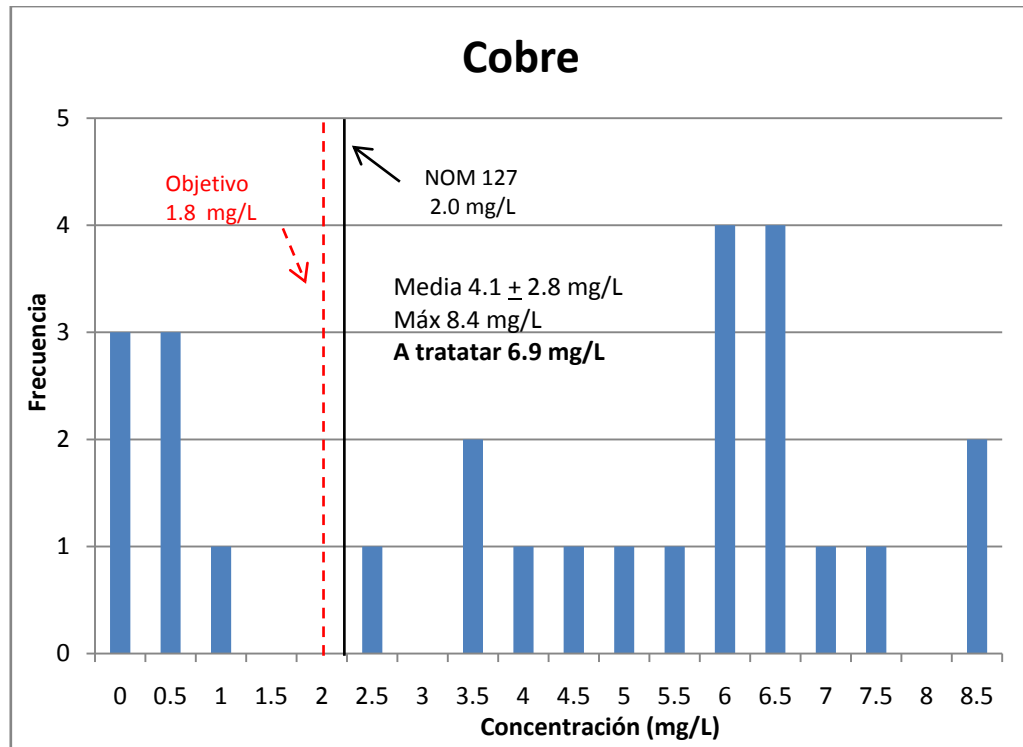


Figura 23. Frecuencia de datos para Cobre

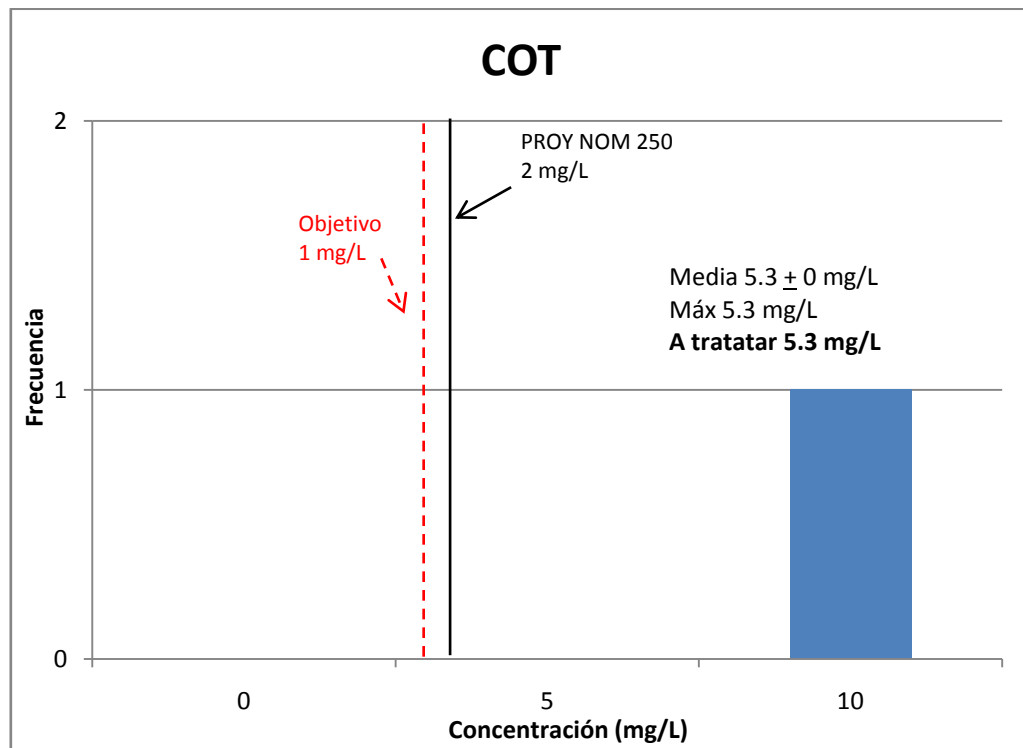


Figura 24. Frecuencia de datos para Carbono Orgánico Total

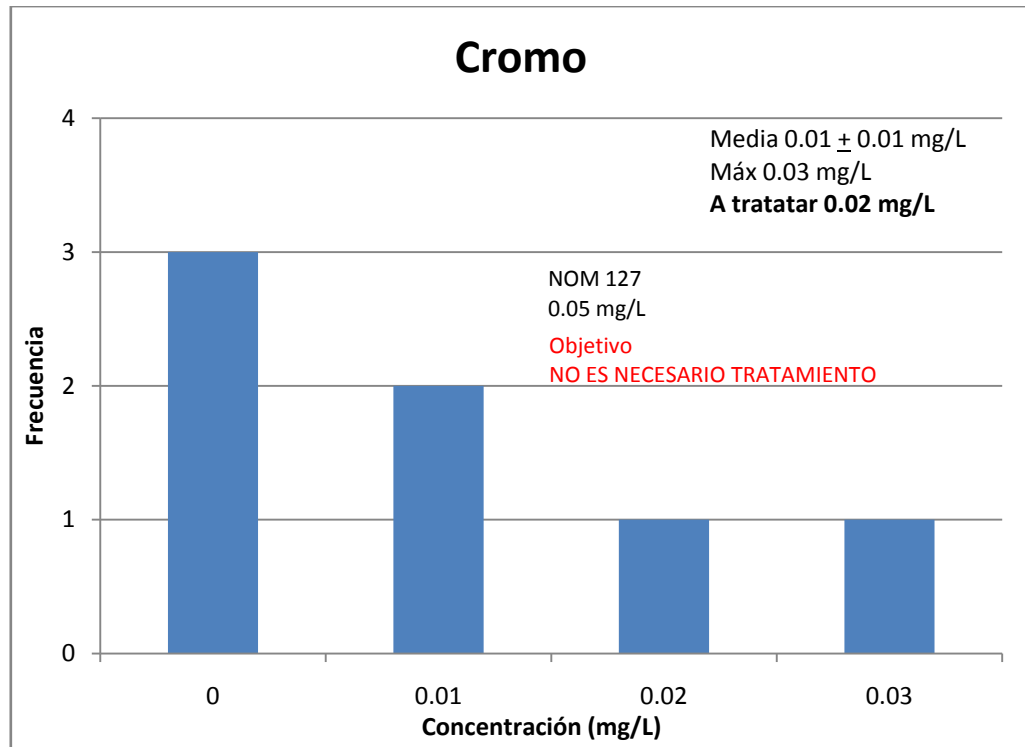


Figura 25. Frecuencia de datos para Cromo

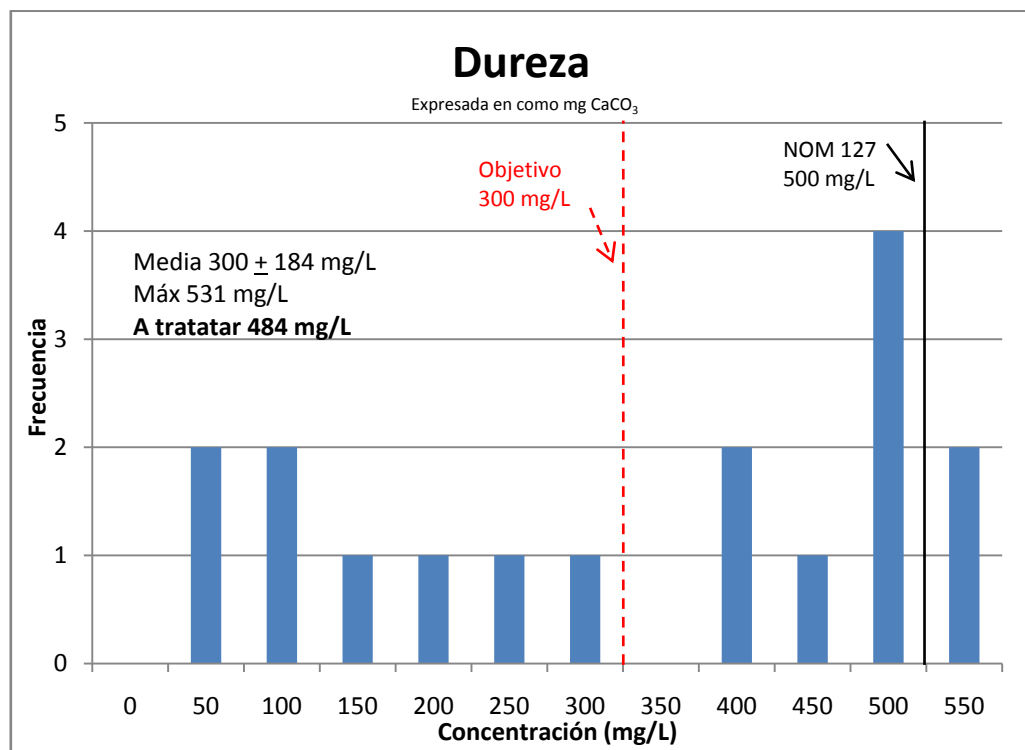


Figura 26. Frecuencia de datos para Dureza Total

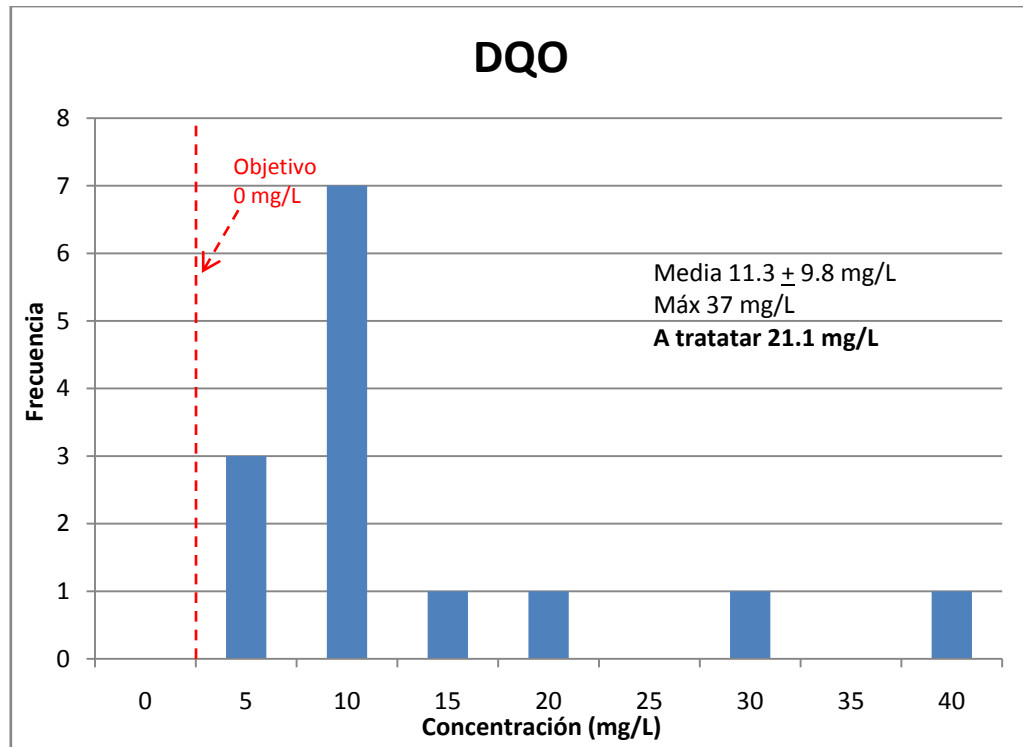


Figura 27. Frecuencia de datos para Demanda Química de Oxígeno

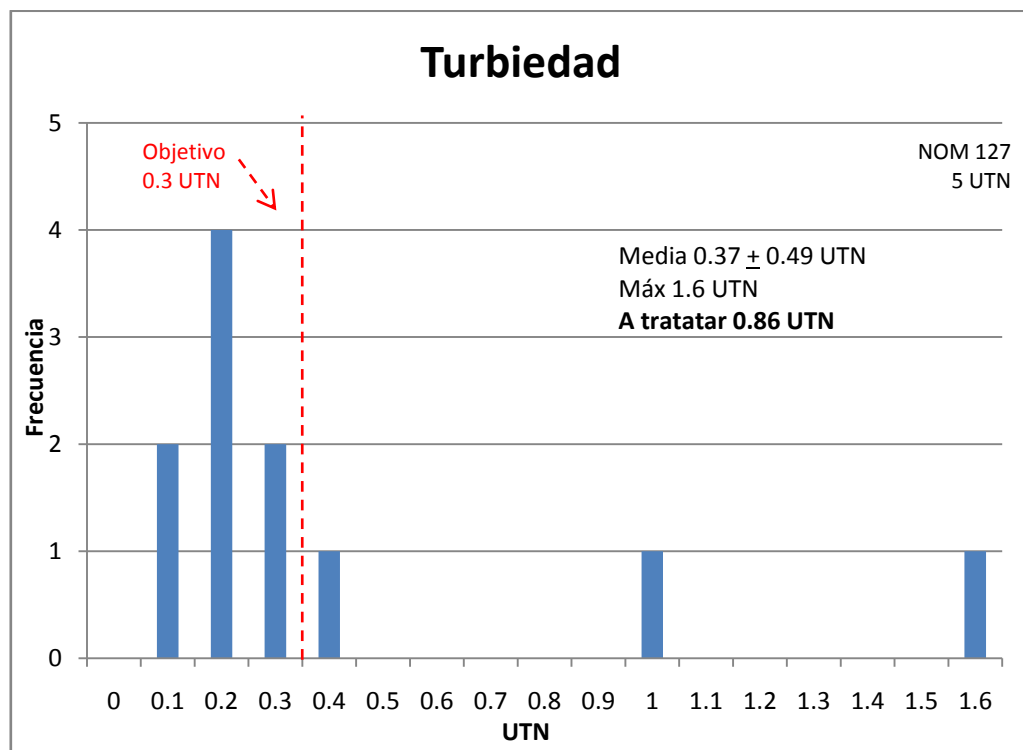


Figura 28. Frecuencia de datos para Turbiedad

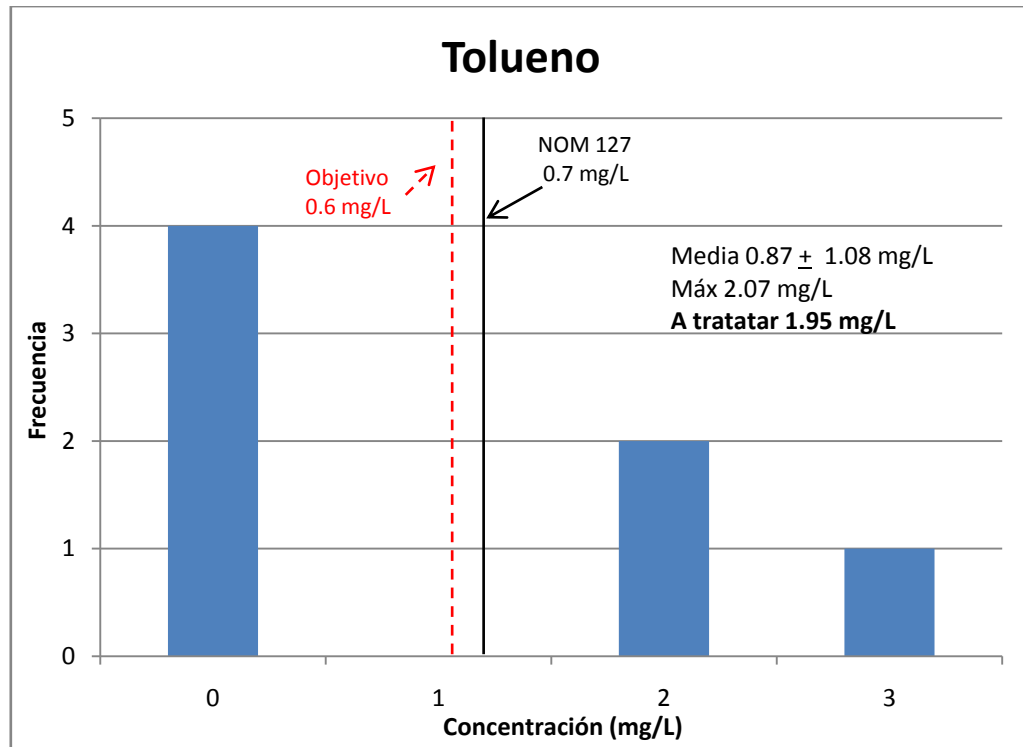


Figura 29. Frecuencia de datos para Tolueno

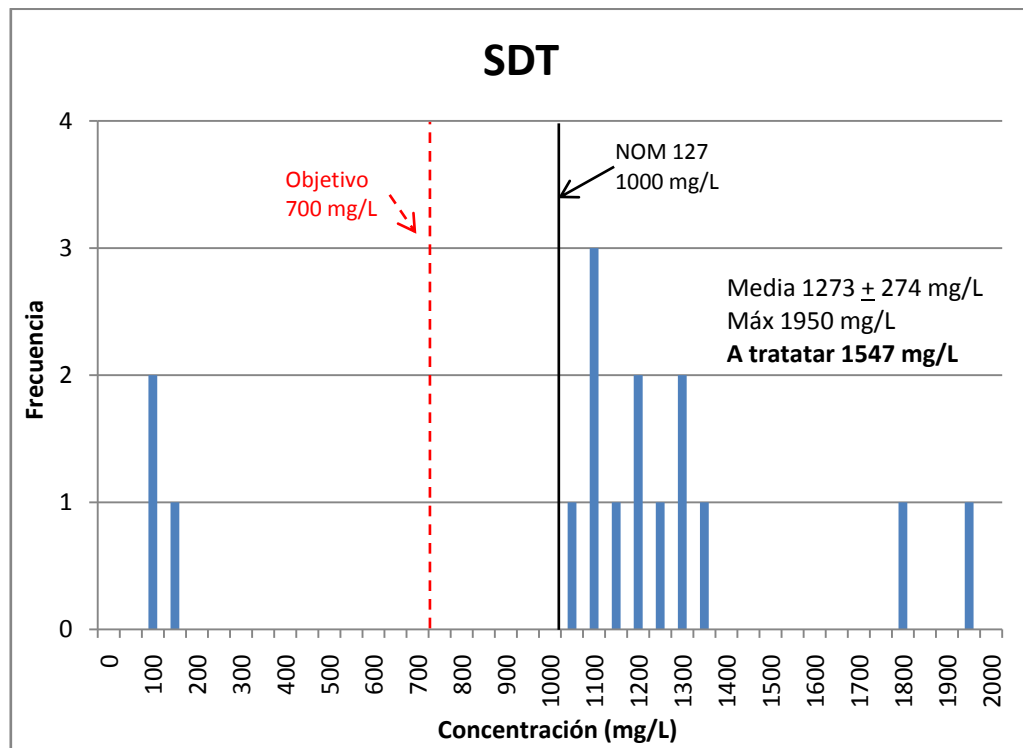


Figura 30. Frecuencia de datos para Sólidos Disueltos Totales

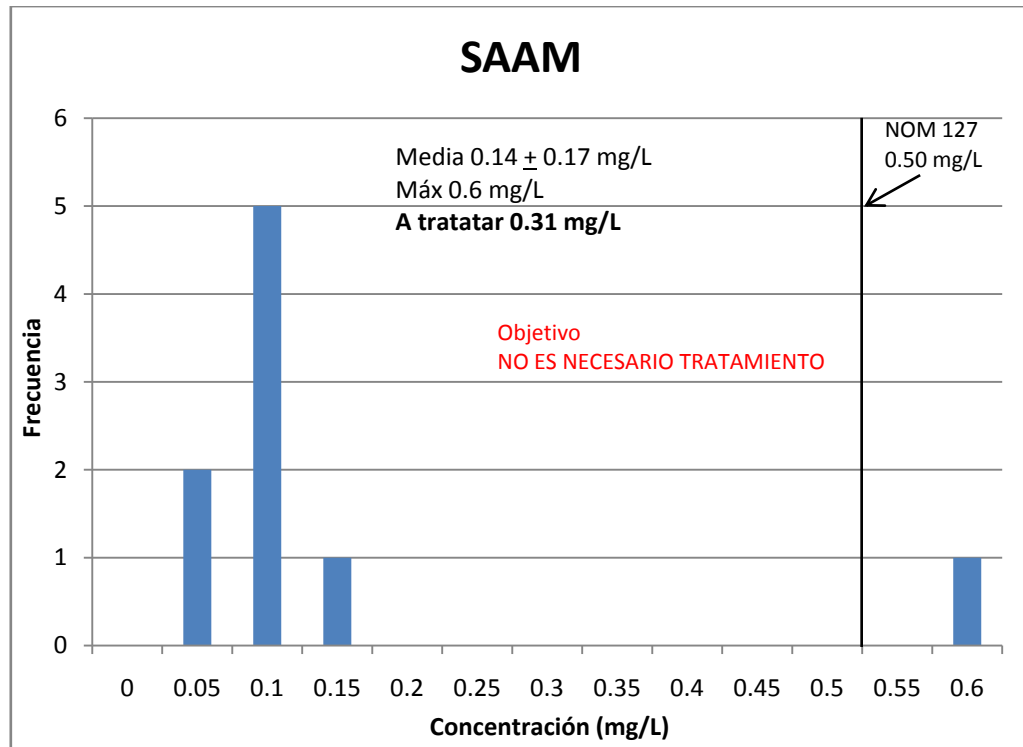


Figura 31. Frecuencia de datos para Sustancias Activas al Azul de Metileno

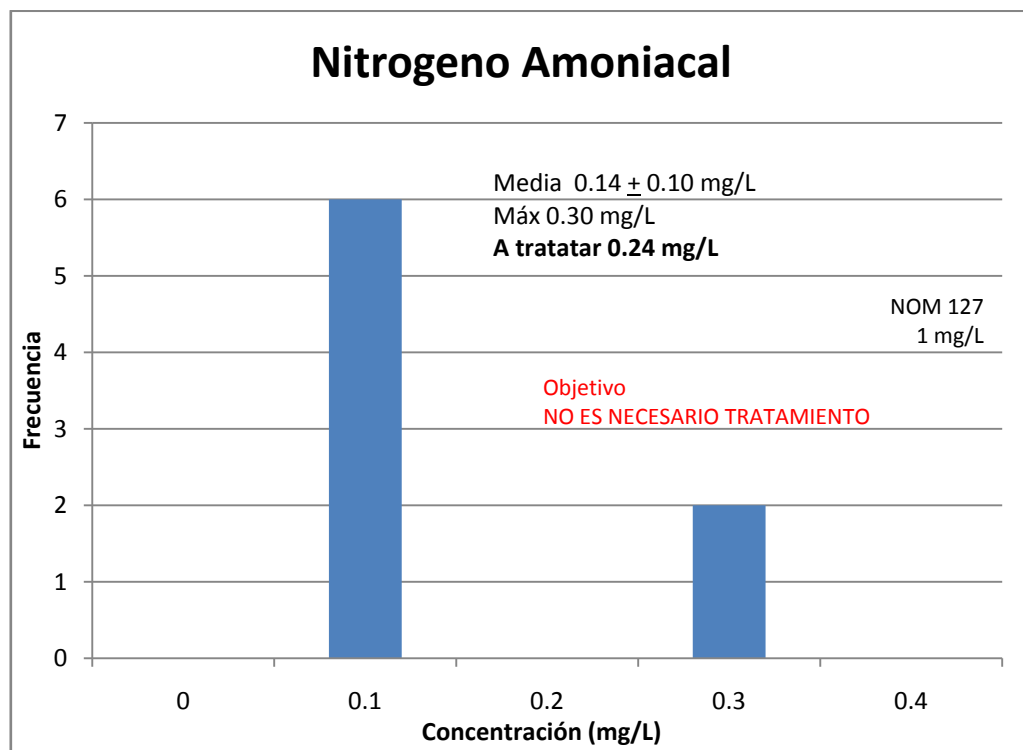


Figura 32. Frecuencia de datos para Nitrógeno Amoniacal

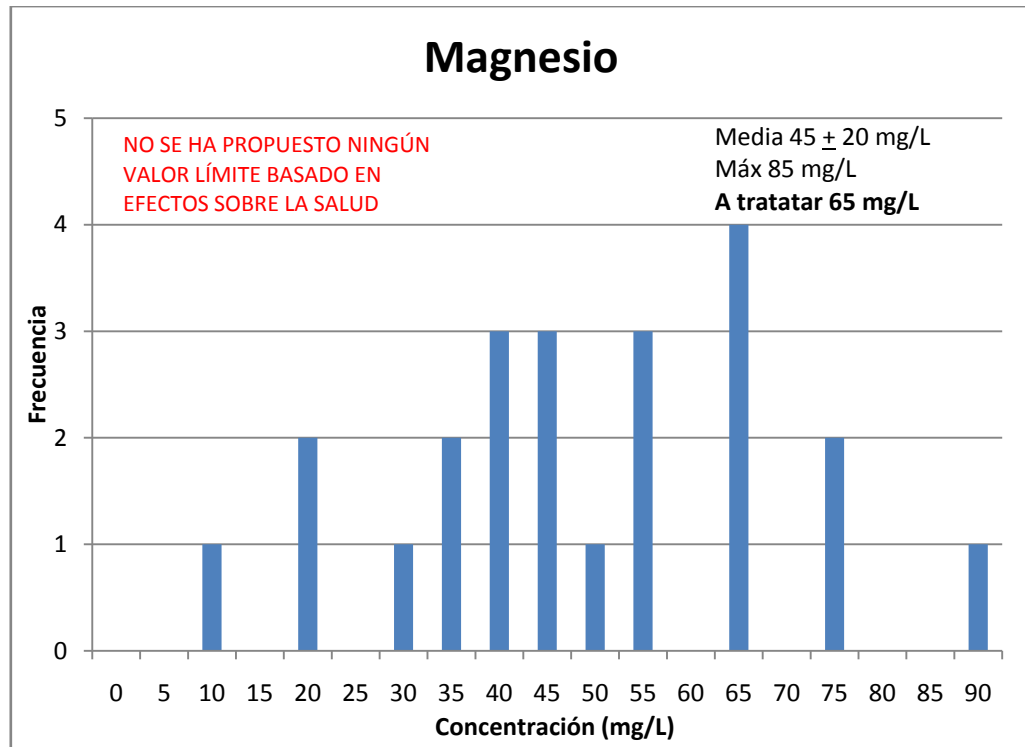


Figura 33. Frecuencia de datos para Magnesio

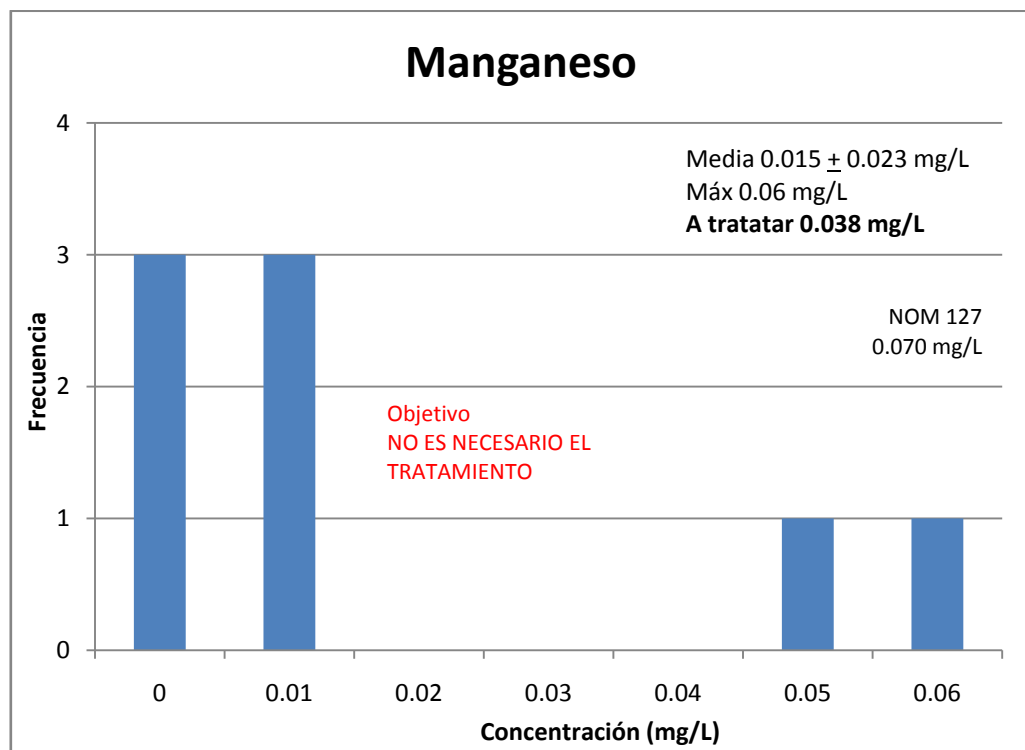


Figura 34. Frecuencia de datos para Manganeso

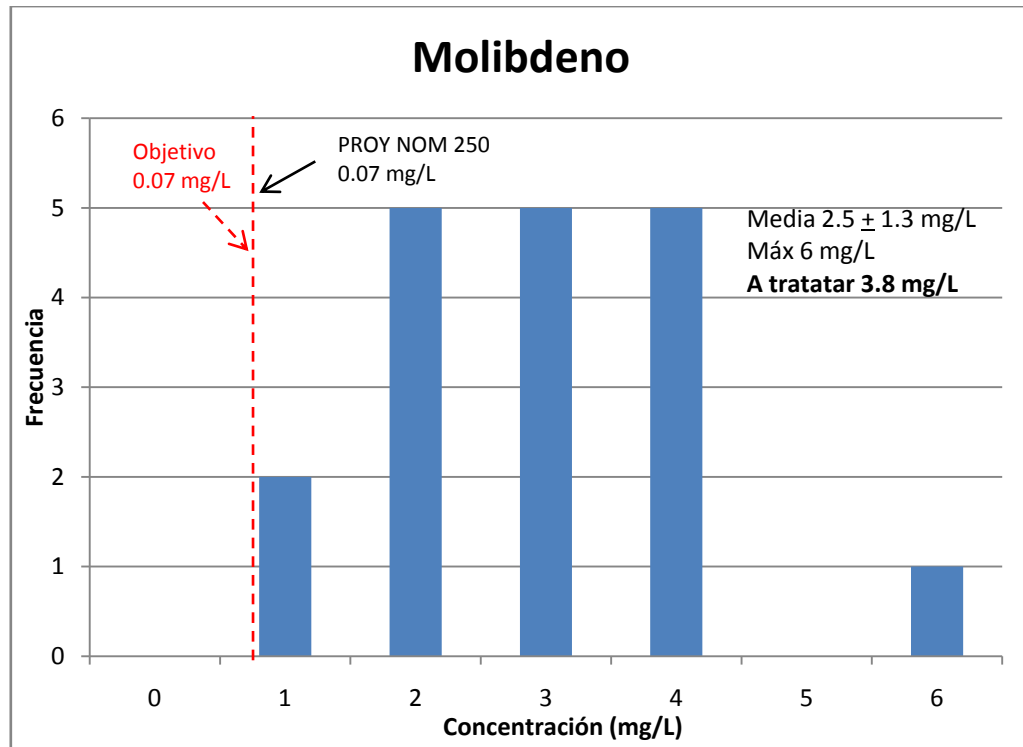


Figura 35. Frecuencia de datos para Molibdeno

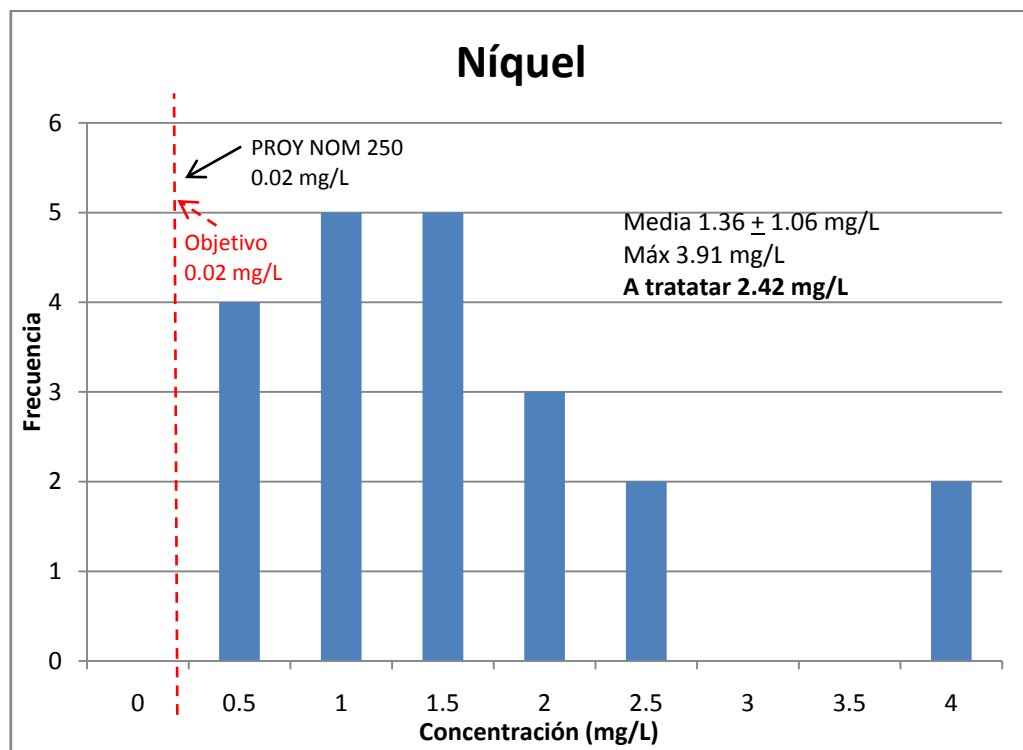


Figura 36. Frecuencia de datos para Níquel

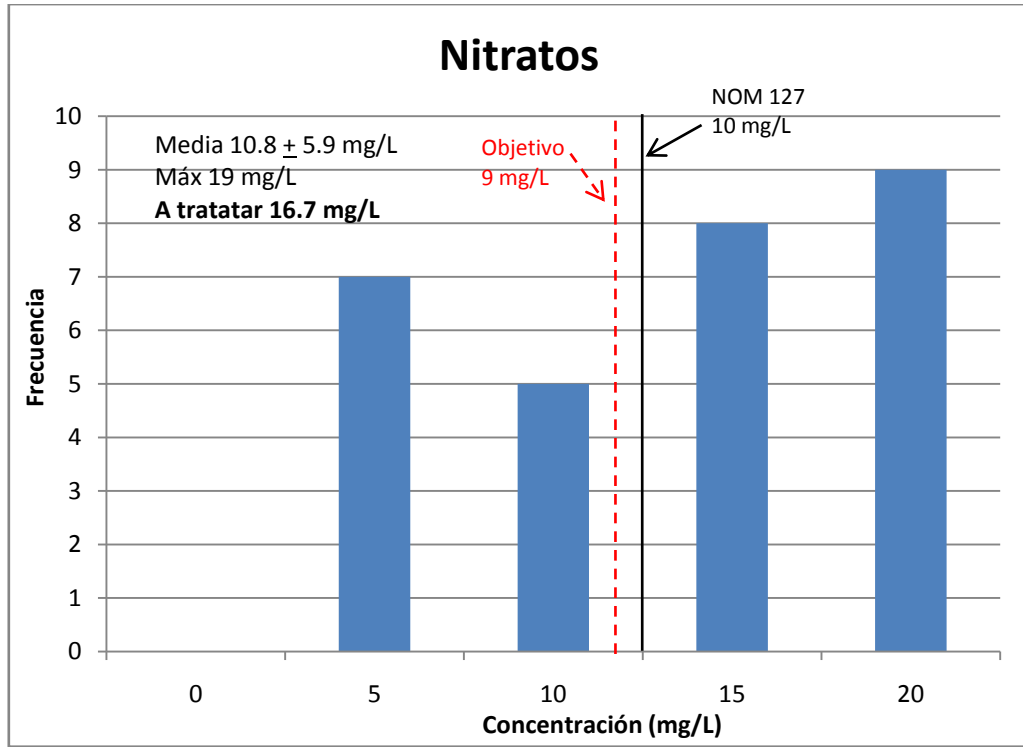


Figura 37. Frecuencia de datos para Nitratos

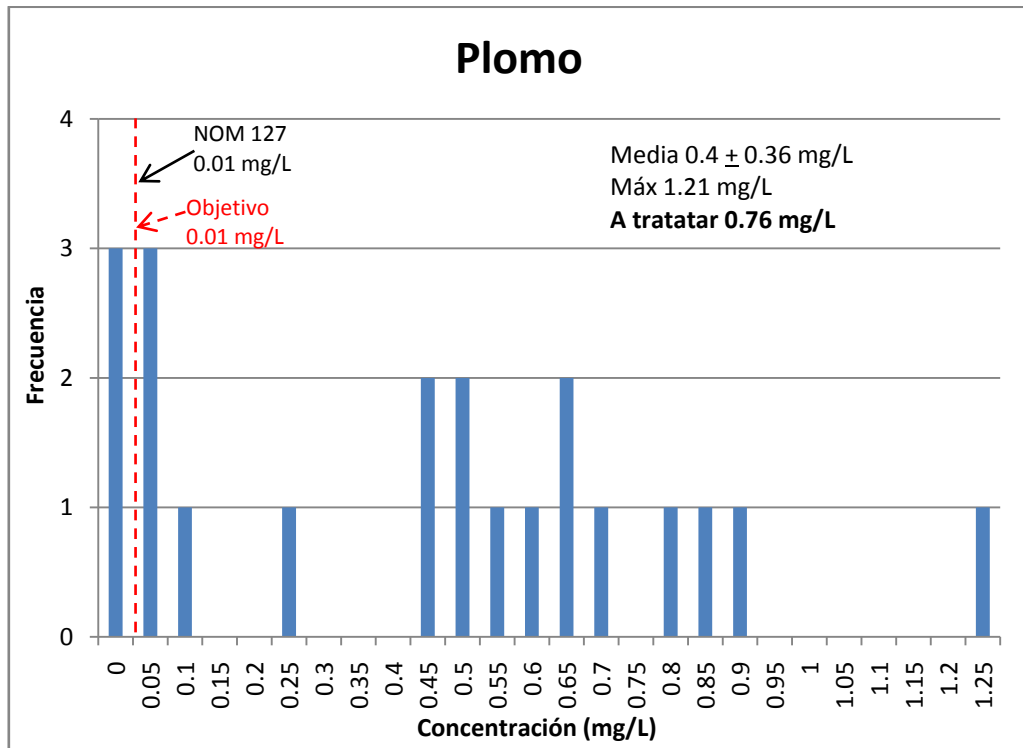


Figura 38. Frecuencia de datos para Plomo

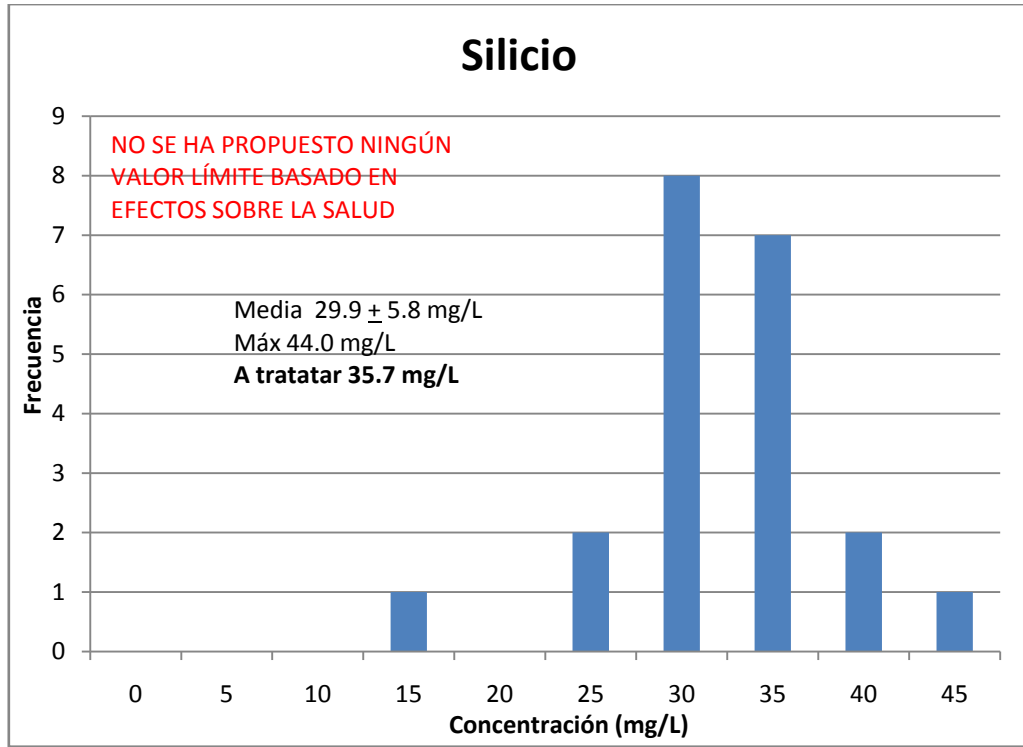


Figura 39. Frecuencia de datos para Silicio

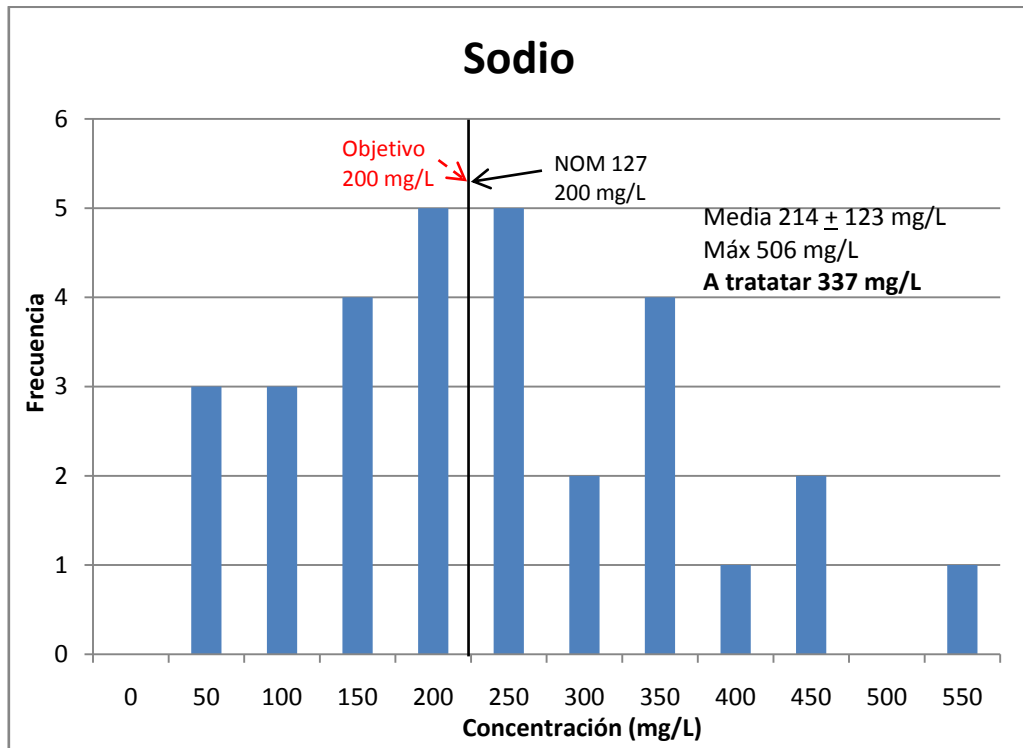


Figura 40. Frecuencia de datos para Sodio

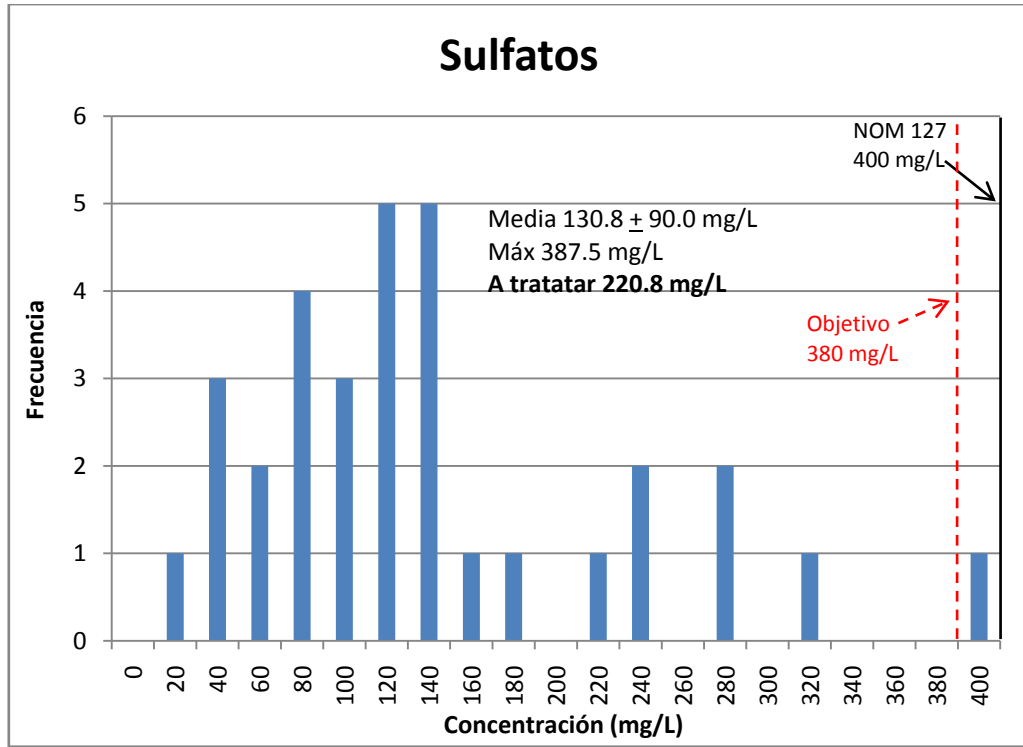


Figura 41. Frecuencia de datos para Sulfatos

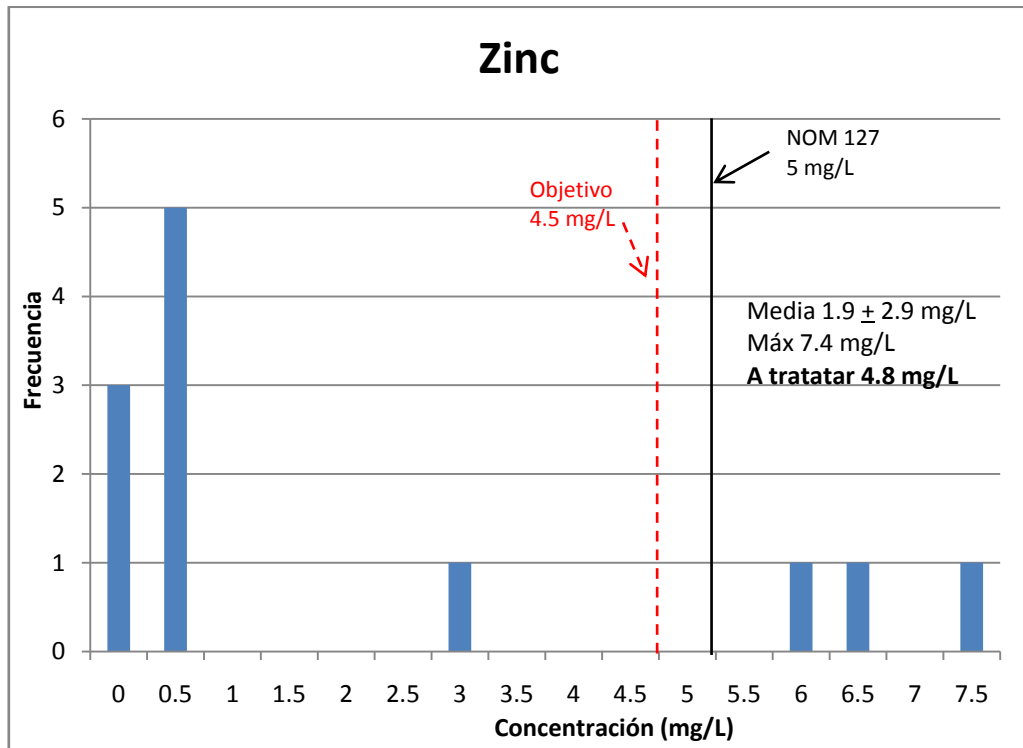


Figura 42. Frecuencia de datos para Zinc

Anexo C: Normatividad en materia de agua para abastecimiento.

La tabla siguiente contiene la normatividad mexicana y criterios internacionales en materia de agua para abastecimiento, se han organizado un total de 182 parámetros en los siguientes nueve grupos: microbiológicos, organolépticos, físicos y químicos, inorgánicos, orgánicos, plaguicidas, desinfectantes, subproductos de los desinfectantes y radiactivos. Las fuentes referidas en este documento son las que se enumeran a continuación, tal como aparecen en la tabla.

NOM 127 (1994) – Norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994. Salud Ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.

PROYNOM250 (2007) – PROY-NOM-250-SSA1-2007. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad de agua, control y vigilancia de los sistemas de abastecimiento.

EPA (2009) – Agencia de Protección Ambiental. National Primary Drinking Water Regulations.

OMS (2006) – Organización Mundial de la Salud. (2006) Guías para la calidad del agua potable.

UE (1998) – Directiva 98/83/CE del consejo de noviembre de 1998 relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano.

Tabla 25. Normatividad mexicana y criterios internacionales en materia de agua para abastecimiento

Parámetro	Unidad	NOM 127 1994	PROYNOM250 2007	EPA 2009	OMS 2006	UE 1998	
Microbiológicos (19)	Organismos coliformes totales	NMP/100mL ¹	Ausencia o no detectable	0	5% ¹⁷	Ausencia o no detectable	0
	Organismos coliformes fecales, E. Coli u Organismos termotolerantes	NMP/100mL	Ausencia o no detectable	Ausencia o no detectable	5%	Ausencia o no detectable	0
	Giardia lamblia	Quistes/L ²	N.E. ¹⁶	0/20 L	N.E.	N.E.	N.E.
	Legionella	NMP/100mL	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
	Enterococos	NMP/100mL	N.E.	N.E.	N.E.	Ausencia o no detectable	0
	Clostridium perfringens (incluidas esporas)	NMP/100mL	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	0
	Colifagos	Fago/L ³	N.E.	Ausente/1 L	0	N.E.	N.E.
	Cryptosporidium	Quistes/L	N.E.	N.E.	0	N.E.	N.E.
	Entamoeba hystolica	Quistes/L	N.E.	0/20 L	N.E.	N.E.	N.E.
Organolépticos (3)	Color	U - Pt/Co ⁴	20	15	15	15	Agradable
	Olor	-	Agradable	3 (No. Umbral)	3 (No. Umbral)	Agradable	Agradable
	Sabor	-	Agradable	1 (No. Umbral)	N.E.	Agradable	Agradable

	Parámetro	Unidad	NOM 127 1994	PROYNOM250 2007	EPA 2009	OMS 2006	UE 1998
Físicos y Químicos (6)	Conductividad eléctrica	µS/cm ⁵	N.E.	1200	N.E.	N.E.	2500
	Potencial de Hidrógeno [pH]	U – pH ⁶	6,5-8,5	6,5-8,5	6,5-8,5	6,5-9,5	6,5-9,5
	Turbiedad	UTN ⁷	5	3	N.E.	N.E.	Aceptable
	Sólidos Disueltos Totales	mg/L ⁸	1000	500	N.E.	N.E.	1000
	Corrosividad	-	N.E.	N.E.	No corrosivo	N.E.	N.E.
	Oxidabilidad	mg/L O ₂ ⁹	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	5
Inorgánicos (30)	Aluminio	mg/L	0,2	0,2	0,05-0,2	0,2	0,2
	Amonio	mg/L	N.E.	N.E.	N.E.	35	0,5
	Antimonio	mg/L	N.E.	0,02	0,006	0,02	0,005
	Arsénico	mg/L	0,025	0,01	0,01	0,01	0,001
	Asbesto	MFL ¹⁰	N.E.	N.E.	7	N.E.	N.E.
	Bario	mg/L	0,7	0,7	2	0,7	N.E.
	Berilio	mg/L	N.E.	N.E.	0,004	N.E.	N.E.
	Boro	mg/L	N.E.	0,5	N.E.	0,5	1
	Cadmio	mg/L	0,005	0,003	0,005	0,003	0,005
	Cianuros (como CN ⁻)	mg/L	0,07	0,07	0,2	0,07	N.E.
	Cloruros (como Cl)	mg/L	250	N.E.	250	N.E.	250
	Cobre	mg/L	2	2	1,3	2	2
	Cromo total	mg/L	0,05	0,05	0,1	0,05	0,05
	Dureza total (CaCO ₃)	mg/L	500	500	N.E.	N.E.	N.E.
	Fluoruros (como F ⁻)	mg/L	1,5	0,7	4	1,5	1,5
	Hierro	mg/L	0,3	0,3	0,3	N.E.	0,2
	Manganeso	mg/L	0,15	0,15	0,05	0,4	0,05
	Mercurio	mg/L	0,001	0,001	0,002	0,006	0,01
	Molibdeno	mg/L	N.E.	0,07	N.E.	0,07	N.E.
	Níquel	mg/L	N.E.	0,02	N.E.	0,07	0,02
	Nitratos (como N)	mg/L	10	10	10	50 (como NO ₃ ⁻)	50 (como NO ₃ ⁻)
	Nitritos (como N)	mg/L	1	0,06	1	3 (como NO ₂ ⁻)	0,5 (como NO ₂ ⁻)
	Nitrógeno amoniacal (como N)	mg/L	0,5	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
	Plata	mg/L	N.E.	N.E.	0,1	N.E.	N.E.
	Plomo	mg/L	0,01	0,01	0,015	0,01	0,01
	Selenio	mg/L	N.E.	0,01	0,05	0,01	0,01
	Sodio	mg/L	200	N.E.	N.E.	200	200
	Sulfatos (como SO ₄ ⁻)	mg/L	400	N.E.	250	N.E.	250
Talio	mg/L	N.E.	N.E.	0,002	N.E.	N.E.	
Zinc	mg/L	5	N.E.	5	N.E.	N.E.	
Orgánicos (58)	1,1,1-Tricloroetano	µg/L ¹¹	N.E.	N.E.	200	N.E.	N.E.
	1,1,2-Tricloroetano	µg/L	N.E.	N.E.	5	N.E.	N.E.
	1,1-Dicloroetano	µg/L	N.E.	30	N.E.	N.E.	N.E.
	1,1-Dicloroetileno	µg/L	N.E.	N.E.	7	N.E.	N.E.

	Parámetro	Unidad	NOM 127 1994	PROYNOM250 2007	EPA 2009	OMS 2006	UE 1998
Orgánicos (58)	1,2,4-Triclorobenceno	µg/L	N.E.	N.E.	70	N.E.	N.E.
	1,2-Dibromoetano	µg/L	N.E.	0,4	0,4	0,4	N.E.
	1,2-Diclorobenceno	µg/L	N.E.	1000	600	1000	N.E.
	1,2-Dicloroetano	µg/L	N.E.	30	5	30	3
	1,2-Dicloroetano	µg/L	N.E.	50	5	50	N.E.
	Trans-1,2-Dicloroetileno	µg/L	N.E.	N.E.	100	N.E.	N.E.
	1,2-Dicloropropano [1,2 DCP]	µg/L	N.E.	40	5	40	N.E.
	1,4-Diclorobenceno	µg/L	N.E.	300	75	300	N.E.
	1,4-Dioxano	µg/L	N.E.	N.E.	N.E.	50	N.E.
	Ácido edético [EDTA]	µg/L	N.E.	600	N.E.	600	N.E.
	Ácido nitriloacético [ANT]	µg/L	N.E.	200	N.E.	200	N.E.
	Acrilamida	µg/L	N.E.	0,5	0	0,5	0,1
	Benceno	µg/L	10	10	5	10	1
	Benzo[a]pireno	µg/L	N.E.	0,7	0,2	0,7	0,01
	Bifenilos policlorados [PCBs]	µg/L	N.E.	0,5	0,5	N.E.	N.E.
	Carbón Orgánico Purgable	µg/L	N.E.	10	N.E.	N.E.	N.E.
	Carbón Orgánico Total [COT]	µg/L	N.E.	200	N.E.	N.E.	N.E.
	Cis-1,2-Dicloroetileno	µg/L	N.E.	N.E.	70	N.E.	N.E.
	Clorobenceno	µg/L	N.E.	N.E.	100	N.E.	N.E.
	Cloruro de cianógeno	µg/L	N.E.	N.E.	70	70	N.E.
	Cloruro de vinilo	µg/L	N.E.	3	2	0,3	0,5
	Di(2-etilhexil)adipato	µg/L	N.E.	N.E.	400	N.E.	N.E.
	Di(2-etilhexil)ftalato	µg/L	N.E.	8	6	8	N.E.
	Dibromuro de etileno	µg/L	N.E.	N.E.	0,05	N.E.	N.E.
	Dicloroacetato	µg/L	N.E.	N.E.	N.E.	50	N.E.
	Diclorometano	µg/L	N.E.	20	5	20	N.E.
	Dioxin [2,3,7,8-TCDD]	µg/L	N.E.	3x10 ⁻⁵	N.E.	N.E.	N.E.
	Epiclorhidrina	µg/L	N.E.	0,4	N.E.	0,4	0,1
	Estireno	µg/L	N.E.	20	100	20	N.E.
	Etilbenceno	µg/L	300	300	700	300	N.E.
	Fenoles o compuestos fenólicos	µg/L	300	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
	Halógeno orgánico absorbible fijo	µg/L	N.E.	0,5	N.E.	N.E.	N.E.
	Halógeno orgánico absorbible purgable	µg/L	N.E.	1	N.E.	N.E.	N.E.
	Hexaclorobenceno	µg/L	1	N.E.	1	N.E.	N.E.
Hexaclorobutadieno	µg/L	N.E.	0,6	N.E.	0,6	N.E.	
Hexaclorociclopentadieno	µg/L	N.E.	N.E.	50	N.E.	N.E.	
Hidrocarburos aromáticos policíclicos [HAP]	µg/L	N.E.	N.E.	N.E.	0,7	0,1	
Metilbutileter	µg/L	N.E.	40	N.E.	N.E.	N.E.	
Microcistina-LR	µg/L	N.E.	1	N.E.	1	N.E.	
Monocloroacetato	µg/L	N.E.	N.E.	N.E.	20	N.E.	

	<i>Parámetro</i>	<i>Unidad</i>	<i>NOM 127 1994</i>	<i>PROYNOM250 2007</i>	<i>EPA 2009</i>	<i>OMS 2006</i>	<i>UE 1998</i>
Orgánicos (58)	o-Diclorobenceno	µg/L	N.E.	N.E.	600	N.E.	N.E.
	p-Diclorobenceno	µg/L	N.E.	N.E.	75	N.E.	N.E.
	Orgánicos no halogenados	µg/L	N.E.	10	N.E.	N.E.	N.E.
	Sustancias Activas al Azul de Metileno	µg/L	500	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
	Tetracloroetano	µg/L	N.E.	N.E.	N.E.	40	10
	Tetracloroetileno	µg/L	N.E.	40	5	N.E.	N.E.
	Tetracloruro de carbono	µg/L	N.E.	4	5	4	N.E.
	Tolueno	µg/L	700	700	1000	700	N.E.
	Tricloroacetaldehído	µg/L	N.E.	200	N.E.	N.E.	N.E.
	Tricloroacetato	µg/L	N.E.	N.E.	N.E.	200	N.E.
	Tricloroetano	µg/L	N.E.	70	20	20	N.E.
	Tricloroetano	µg/L	N.E.	N.E.	N.E.	20	10
	Tricloroetileno	µg/L	N.E.	N.E.	5	N.E.	N.E.
	Xileno (total de isómeros)	µg/L	500	500	10 000	500	N.E.
Plaguicidas (47)	1,2-Dibromo-3-Cloropropano [DBCP]	µg/L	N.E.	1	0,2	1	N.E.
	1,3-Dicloropropeno	µg/L	N.E.	20	N.E.	20	N.E.
	2,4,5-T	µg/L	N.E.	9	N.E.	9	N.E.
	2,4,5-TP (Silvex)	µg/L	N.E.	9	50	N.E.	N.E.
	2,4-D [ácido 2,4-diclorofenoxiacético]	µg/L	30	30	70	30	N.E.
	2,4-DB [Ácido 4-(2,4-diclorofenoxi) butírico]	µg/L	N.E.	90	N.E.	90	N.E.
	Ácido 2-Metil-4-Clorofenoxiacético [MCPA]	µg/L	N.E.	2	N.E.	2	N.E.
	Alacloro	µg/L	N.E.	20	20	20	N.E.
	Aldicarb	µg/L	N.E.	10	N.E.	10	N.E.
	Aldrín	µg/L	0,3	0,3	N.E.	0,03	0,03
	Atrazina	µg/L	N.E.	2	3	2	N.E.
	Carbofurán	µg/L	N.E.	7	40	7	N.E.
	Cianazina	µg/L	N.E.	0,6	N.E.	0,6	N.E.
	Clordano (total de isómeros)	µg/L	0,2	0,2	2	0,2	N.E.
	Clorotolurón	µg/L	N.E.	30	N.E.	30	N.E.
	Clorpirifos	µg/L	N.E.	30	N.E.	30	N.E.
	Dalapon	µg/L	N.E.	N.E.	200	N.E.	N.E.
	DDT (Total de isómeros)	µg/L	1	1	N.E.	1	N.E.
	Diclorprop	µg/L	N.E.	100	N.E.	100	N.E.
	Dieldrín	µg/L	0,3	0,3	N.E.	0,3	0,03
	Dimetoato	µg/L	N.E.	6	N.E.	6	N.E.
	Dinoseb	µg/L	N.E.	N.E.	7	N.E.	N.E.
	Diquat	µg/L	N.E.	N.E.	20	N.E.	N.E.
	Endothall	µg/L	N.E.	N.E.	100	N.E.	N.E.
Endrín	µg/L	N.E.	0,6	2	0,6	N.E.	
Epóxido de heptacloro	µg/L	0,03	N.E.	0,2	N.E.	0,03	

	<i>Parámetro</i>	<i>Unidad</i>	<i>NOM 127 1994</i>	<i>PROYNOM250 2007</i>	<i>EPA 2009</i>	<i>OMS 2006</i>	<i>UE 1998</i>	
Plaguicidas (47)	Fenoprop	µg/L	N.E.	N.E.	N.E.	9	N.E.	
	Glifosato	µg/L	N.E.	N.E.	700	N.E.	N.E.	
	Heptacloro	µg/L	0,03	N.E.	0,4	N.E.	0,03	
	Isoproturon	µg/L	N.E.	9	N.E.	9	N.E.	
	Lindano	µg/L	2	2	0,2	2	N.E.	
	Mecoprop	µg/L	N.E.	10	N.E.	10	N.E.	
	Metolacloro	µg/L	N.E.	10	N.E.	10	N.E.	
	Metoxicloro	µg/L	N.E.	20	40	20	N.E.	
	Molinato	µg/L	N.E.	6	N.E.	6	N.E.	
	Oxamilo (Vydate)	µg/L	N.E.	N.E.	200	N.E.	N.E.	
	Pendimetalina	µg/L	N.E.	20	N.E.	20	N.E.	
	Pentaclorofenol	µg/L	N.E.	9	1	9	N.E.	
	Permetrina	µg/L	N.E.	N.E.	N.E.	300	N.E.	
	Picloram	µg/L	N.E.	N.E.	500	N.E.	N.E.	
	Piriproxifeno	µg/L	N.E.	500	N.E.	300	N.E.	
	Plaguicidas	µg/L	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	0.1	
	Simazina	µg/L	N.E.	2	4	2	N.E.	
	Terbutilazina [TBA]	µg/L	N.E.	7	N.E.	7	N.E.	
	Total plaguicidas	µg/L	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	0,5
	Toxafeno	µg/L	N.E.	N.E.	3	N.E.	N.E.	N.E.
Trifluralina	µg/L	N.E.	20	N.E.	20	N.E.	N.E.	
Desinfectantes (4)	Cloro Residual Libre	mg/L	0,2-1,5	0,2-1,5	4	5	N.E.	
	Dióxido de cloro (ClO ₂)	mg/L	N.E.	N.E.	0.8	N.E.	N.E.	
	Monocloramina	mg/L	N.E.	N.E.	N.E.	3	N.E.	
	Yodo Residual Libre	mg/L	0,2-0,5	0,2-0,5	N.E.	N.E.	N.E.	
Subproductos de los desinfectantes (17)	2,4,6-Triclorofenol	mg/L	N.E.	0,2	N.E.	0,2	N.E.	
	Ácido cloroacético	mg/L	N.E.	0,02	N.E.	N.E.	N.E.	
	Ácido dicloroacético	mg/L	N.E.	0,5	N.E.	N.E.	N.E.	
	Ácido haloacético	mg/L	N.E.	N.E.	0,06	N.E.	N.E.	
	Ácido tricloroacético	mg/L	N.E.	0,2	N.E.	N.E.	N.E.	
	Bromato	mg/L	N.E.	0,01	0,01	0,01	0,01	
	Bromodichlorometano	mg/L	N.E.	0,06	N.E.	0,06	N.E.	
	Bromoformo	mg/L	N.E.	0,1	N.E.	0,1	N.E.	
	Cloraminas (como Cl ₂)	mg/L	N.E.	N.E.	4	N.E.	N.E.	
	Clorato	mg/L	N.E.	0,7	N.E.	0,7	N.E.	
	Clorito	mg/L	N.E.	0,7	1	0,7	N.E.	
	Cloroformo	mg/L	N.E.	0,2	N.E.	0,3	N.E.	
	Dibromoacetoniitrilo	mg/L	N.E.	N.E.	N.E.	0.07	N.E.	
	Dibromoclorometano	mg/L	N.E.	0,1	N.E.	0,1	N.E.	
Subproductos de	Dicloroacetoniitrilo	mg/L	N.E.	N.E.	N.E.	20	N.E.	

Parámetro		Unidad	NOM 127 1994	PROYNOM250 2007	EPA 2009	OMS 2006	UE 1998
los desinfectantes (17)	Formaldehído	mg/L	N.E.	0,9	N.E.	N.E.	N.E.
	Trihalometanos totales	mg/L	N.E.	0,2	0.08	0.2	0.1
Radiactivos (8)	Radiactividad alfa global	Bq/L ¹²	0,56	0,56	N.E.	N.E.	N.E.
	Radiactividad beta total	Bq/L	1,85	1,85	N.E.	N.E.	N.E.
	Partículas alfa	pCi/L ¹³	N.E.	N.E.	15	N.E.	N.E.
	Partículas beta y emisores fotón	mrems/año ¹⁴	N.E.	N.E.	4	N.E.	N.E.
	Radio 226 y 228 combinados	pCi/L	N.E.	N.E.	5	N.E.	N.E.
	Uranio	mg/L	N.E.	N.E.	0,03	0,015	N.E.
	Tritio	Bq/L	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	100
	Dosis indicativa total	mSv/año ¹⁵	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	0,1

(¹) Numero más probable por 100 mililitros. (²) Numero de quistes por litro. (³) Unidades formadoras de placas en 100 mililitros. (⁴) Numero de fagos por litro. (⁵) Unidades de Platino-Cobalto (Color verdadero). (⁶) Micro Siemens por centímetro a 20°C. (⁷) Unidades de potencial de Hidrógeno. (⁸) Unidades de turbiedad nefelométricas. (⁹) Miligramos en un litro de O₂. (¹⁰) Millones de fibras por litro (fibras > 10 micrómetros). (¹¹) Microgramos por litro. (¹²) Becquerel por litro. (¹³) Picocuries por litro. (¹⁴) Milirems por año. (¹⁵) Millisievert por año. (¹⁶) No Especificado. (¹⁷) No más del 5,0 por ciento de las muestras con coliformes totales (CT) positivas en un mes. Toda muestra que presente CT debe analizarse para coliformes fecales o E. coli. Si dos períodos consecutivos de muestras positivas y uno positivo para E. coli o coliformes fecales, el sistema tiene un grave problema de violación de los niveles máximos de contaminación.