

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

6.1 Fuentes de abastecimiento de agua

Una fuente de agua es el desvío de dicho elemento de su ciclo natural para ser utilizada por el hombre. En la naturaleza existen diferentes recursos de agua como son los abastecimientos subterráneos y superficiales.

Los abastecimientos subterráneos tienden a aportar agua excesivamente dura, debido a que los elementos responsables de la dureza son lavados de los depósitos minerales, sin embargo, esta agua requiere menor tratamiento puesto que algunas de las impurezas se eliminan en forma natural al atravesar las capas del suelo y del subsuelo. Se debe tomar siempre en cuenta que la extracción no se realice a profundidades excesivas, ya que se pueden encontrar contaminantes como arsénico que se encuentra presente en forma natural en ciertos estratos del suelo de algunas zonas.

Existen diferentes fuentes de agua: pozos poco profundos son aquellos de profundidad menor a 30 m, pueden ser cavados o entubados. Los pozos profundos se encuentran a profundidades mayores de 30 m y generalmente son perforados. Los manantiales aparecen donde un estrato que lleva agua alcanza la superficie del terreno. Los ríos son una fuente de abastecimiento de agua que requiere mayor tratamiento, sus características y composición varían considerablemente de un día a otro, lo cual hace que no sea una fuente de abastecimiento de agua muy deseable. Los lagos naturales, pueden proporcionar agua de muy buena calidad que requiere un tratamiento mínimo.

6.1.1 Regiones hidrológicas de México

El ciclo hidrológico ocurre en cuencas que son unidades mínimas de manejo de agua, las cuencas nacionales se encuentran agrupadas desde los años 60, en 37 regiones hidrológicas para realizar estudios de calidad de agua.⁽¹⁾



Figura 1. Regiones Hidrológicas de México

Adicionalmente se han definido algunas zonas hidrológicas que corresponden a porciones de estas regiones hidrológicas. Sin embargo, para la administración del recurso hídrico de México, la Comisión Nacional del Agua ha fijado 13 regiones hidrológico – administrativas. ⁽¹⁾

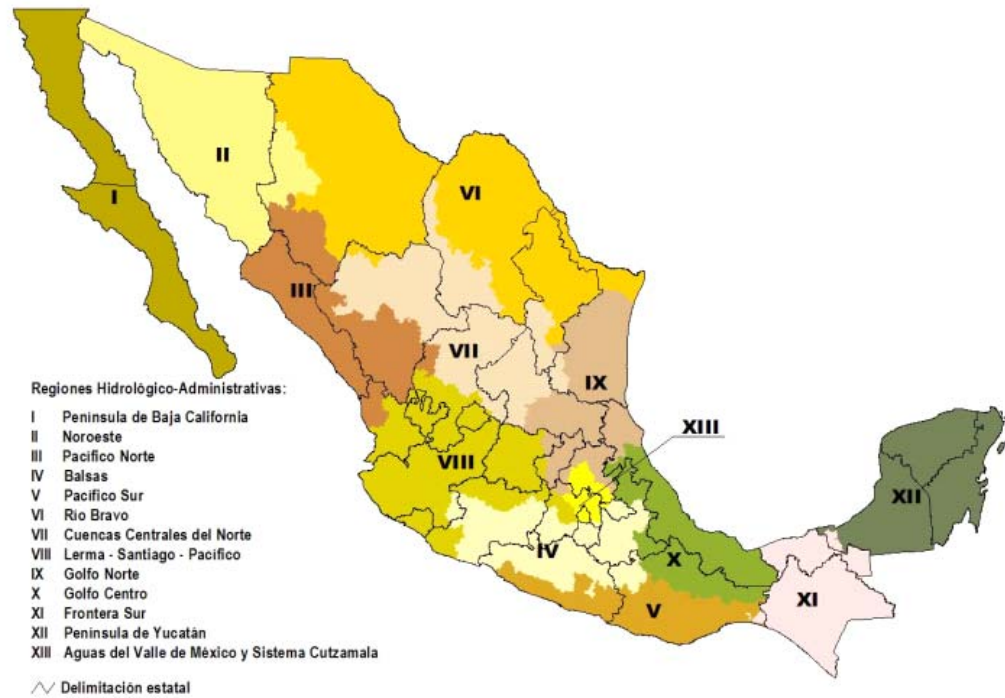


Figura 2. Regiones Hidrológico – Administrativas de la CNA

6.1.2 Componentes del ciclo hidrológico

Alrededor del 70% del agua de lluvia se evapora y regresa a la atmósfera, el resto escurre por los ríos y arroyos o se infiltra al subsuelo y recarga los acuíferos, reflejándose en una disponibilidad natural media interna de 427 km³ y una disponibilidad natural media por habitante de 4547 m³ al año. ⁽¹⁾

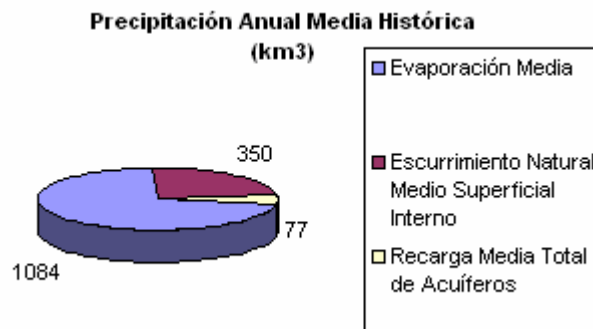


Figura 3. Precipitación anual media histórica

6.1.3 Disponibilidad natural media del agua

La cantidad de agua disponible varía considerablemente de un país a otro y la población presente en cada uno de ellos no necesariamente va acorde a la disponibilidad de este recurso, por lo tanto, se ha utilizado a nivel mundial el indicador de disponibilidad natural media per cápita, que clasifica a los países de la siguiente manera ⁽¹⁾:

Disponibilidad natural media per cápita (m ³ /hab/año)		Clasificación
Menor	a 1 000	Extremadamente baja
1 001	a 2 000	Muy Baja
2 001	a 5 000	Baja
5 001	a 10 000	Media
10 001	a 20 000	Alta
Más	de 20 000	Muy Alta

Fuente: Shiklomanov, I. A. y Rodda, J. C., 2003.

Tabla 1. Disponibilidad natural media del agua per cápita

En México destacan dos grandes zonas en cuanto a disponibilidad se refiere, la norte – centro - noroeste con el 32% de la disponibilidad natural media, a pesar de asentarse en ella el 77% de la población y generarse en ella el 85% del PIB; y la del sureste con el 68% de la disponibilidad natural media del agua ⁽¹⁾. Cabe aclarar que esta disponibilidad se refiere al agua de lluvia que se transforma en escurrimiento de agua superficial y en recarga de acuíferos.

6.1.4 Grado de presión sobre el recurso hídrico

En promedio en México se utiliza el 15% de la disponibilidad natural media de agua, sin embargo, en el norte del país se utiliza más del 40%, lo cual es considerado por la Organización de las Naciones Unidas como fuerte presión sobre el recurso hídrico. En la región hidrológico administrativa de las Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala, la explotación rebasa la disponibilidad. ⁽¹⁾

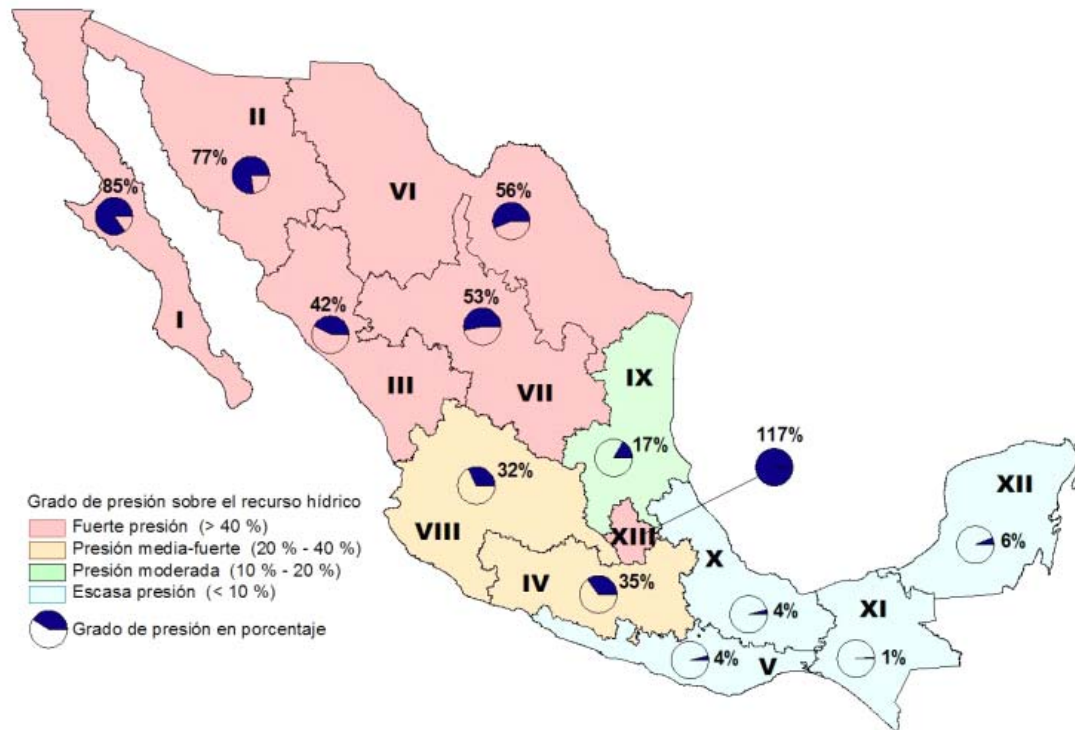


Figura 4. Grado de presión sobre el recurso hídrico

Dada la distribución del agua en el país, las sequías afectan principalmente a los estados del norte que en orden de severidad en cuanto a sus efectos adversos afectan los estados de: Chihuahua, Coahuila, Durango, Nuevo León, Baja California, Sonora, Sinaloa, Zacatecas, San Luis Potosí, Aguascalientes, Guanajuato, Querétaro, **Hidalgo** y Tlaxcala. ⁽¹⁾

6.1.5 Aguas superficiales en México

En los ríos del país escurren alrededor de 399 km³ anualmente, de los cuales aproximadamente el 87% se presenta en los 39 ríos principales. Además, México cuenta con un gran número de lagos, entre los cuales destacan Chapala, Cuitzeo, Pátzcuaro, Yuriria, Catemaco, Tequesquitengo y Nabor Carrillo.

6.1.6 Aguas subterráneas en México

Actualmente varios acuíferos se encuentran sobre explotados, de ellos se extrae el 57% del agua subterránea para todos los usos, lo cual repercute en que la reserva de agua subterránea se esté minando a razón de 6 km³ al año. ⁽¹⁾

Existen varios acuíferos que por su cercanía al mar presentan **problemas de intrusión salina** ubicados en los estados de Baja California Norte, Baja California Sur, Colima, Sonora y Veracruz. ⁽¹⁾

Otros acuíferos presentan el fenómeno de **salinización de suelos o aguas subterráneas salobres** ubicados en los estados de Baja California Norte, Sonora, Chihuahua, Coahuila y Tamaulipas. Las zona áridas, las cuencas cerradas y las costas tienen suelos naturalmente salinos. El riego puede agravar la salinidad cuando se emplea agua de mala calidad rica en minerales como sodio, o si se lleva a cabo de manera excesiva puede llegar a elevar el manto freático formando salitre en la superficie. Se ha detectado como causas de la salinización del agua la presencia de calizas y yesos. ⁽¹⁾

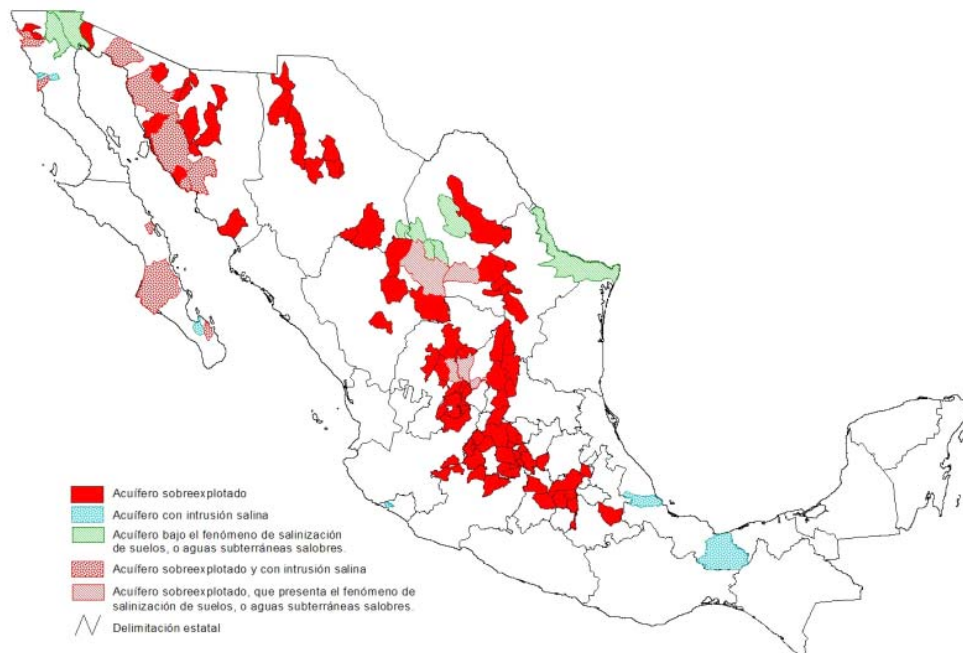


Figura 5. Acuíferos sobre explotados, con intrusión salina y/o bajo el fenómeno de salinización de suelos o aguas subterráneas salobres (Situación al 2003)

6.2 Contaminación del agua

Dependiendo de las características del agua extraída de alguna de las fuentes de abastecimiento y del uso que se le dará se debe aplicar el tratamiento adecuado, para garantizar la remoción de todos los contaminantes que pudieran resultar perjudiciales en una aplicación específica.

6.2.1 Calidad del agua en México

De acuerdo a un estudio realizado por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, México ocupa el lugar 106 de 122 países evaluados. ⁽¹⁾

Valores del indicador de calidad del agua del PNUMA, 2002

País	Valor del indicador de calidad del agua	Lugar que ocupa de 122 países
Canadá	1.45	2
Japón	1.32	5
Corea del Sur	1.27	8
Francia	1.13	10
Estados Unidos	1.04	12
Argentina	1.03	13
Australia	0.73	20
Países Bajos	0.70	21
Brasil	0.64	23
España	0.58	28
Costa Rica	0.23	38
Turquía	0.10	45
Sudáfrica	0.09	47
Alemania	-0.06	57
Egipto	-0.15	63
Guatemala	-0.30	81
China	-0.33	84
México	-0.69	106
Indonesia	-0.77	110
Marruecos	-1.36	121

Fuente: UNESCO, 2003.

Tabla 2. Calidad del agua según PNUMA

6.2.2 Problemas de contaminación del agua en la República Mexicana

En términos generales se han reportado en México algunos casos como la presencia de e-coli y otros microorganismos patógenos, como, pesticidas organoclorados, plomo, arsénico, metil terbutil éter, problemas por intrusión salina y aguas subterráneas salobres, así como aguas subterráneas con infiltración de aguas residuales, por citar algunos casos.

En México se ha logrado una disminución significativa de mortalidad infantil a causa de enfermedades diarreicas provocadas por el agua, sin embargo, hasta el año 2000, la media nacional de mortalidad infantil por esta causa fue de 23.24 niños por cada 100,000 habitantes del mismo grupo poblacional. ⁽¹⁾ En la gráfica, puede observarse que el Estado de Puebla se encuentra en la tercera posición de mortalidad infantil por enfermedades diarreicas.

Mortalidad por enfermedades diarreicas en menores de 5 años por entidad federativa, 2000

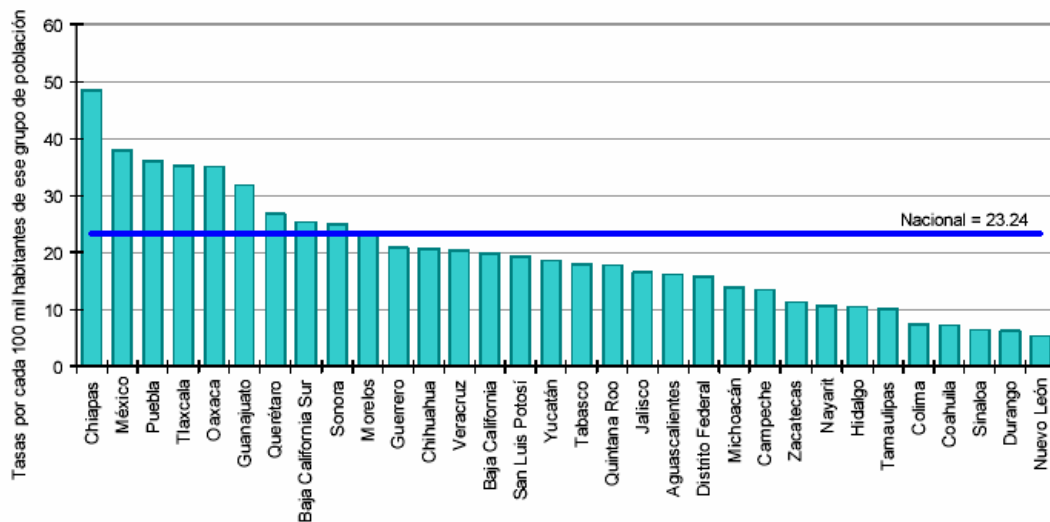


Figura 6. Mortalidad por enfermedades diarreicas en menores de 5 años por entidad federativa, 2000

Se han reportado algunos casos como la presencia de e-coli en Atliaca y Tixtla (Guerrero), como en el Estado de México, microorganismos y pesticidas

organoclorados en el Mezquital (Hidalgo), contaminación por plomo y arsénico en la cuenca de Atoyac – Zahuapan (Puebla - Tlaxcala), contaminación por metil terbutil éter en Durango, problemas por intrusión salina y aguas subterráneas salobres en Maneadero y San Quintín (Baja California Norte), Santo Domingo (Baja California Sur), Caborca (Hermosillo) y San José de Guaymas (Sonora), en Mérida se han encontrado aguas subterráneas con infiltración de aguas residuales, por citar algunos casos.

6.2.3 Saneamiento de cuencas hidrológicas ⁽²³⁾

El saneamiento de cuencas hidrológicas, pretende aliviar los problemas de contaminación del agua y recuperar los niveles de calidad ambiental de la zona así como la calidad de vida de sus habitantes. Para esto, es necesaria la concurrencia de los tres órdenes de gobierno, la participación decidida de los usuarios del agua y las formas organizadas de la sociedad, así como de las organizaciones gremiales e instituciones de investigación.

Cada programa considera un tiempo determinado y acciones concretas para el proyecto, como por ejemplo: nuevas plantas de tratamiento de aguas residuales, implantación, operación y mantenimiento de una red de monitoreo de la calidad del agua, detección de los factores de riesgos de contaminación del agua, mejoramiento de las condiciones sanitarias de localidades rurales, conocimiento de los procesos de la contaminación del agua en las condiciones particulares de la cuenca, etc. Debe considerarse también, que todas estas acciones inducirán un cambio de actitud de los habitantes de la cuenca con respecto al valor social, ambiental y económico del recurso hidráulico.

La Constitución Política de México, en el primer y quinto párrafos del Artículo 27 considera las aguas como un recurso propiedad de la Nación, es decir, pertenece a todos los mexicanos y consecuentemente corresponde a todos la responsabilidad de su buen uso y cuidado. En este sentido, el objetivo nacional en materia de agua se puede

resumir en hacer un uso eficiente de este recurso que contribuya al desarrollo actual y futuro de la sociedad y mantenga la integridad del ciclo hidrológico y de los ecosistemas que dependen de él.

Para el cumplimiento de este objetivo, el gobierno federal realiza esfuerzos para establecer una nueva forma de gestión del agua, acorde con los enfoques y principios que ha venido adoptando la comunidad internacional. Este nuevo esquema contempla a la cuenca hidrográfica como su unidad de gestión; reconoce al agua como un bien con valor económico, ambiental y social; y considera la necesidad de incorporar a la sociedad en la gestión del recurso.

En lo económico el saneamiento de la cuenca permite que la acuacultura y la pesca ribereña se realicen en un ámbito acuático de mejor calidad, que puedan ser aprovechadas aguas residuales para uso agrícola, que se presente un mejor paisaje al mejorar las cualidades del agua del río que descarga en la ciudades y que sea posible reusar aguas tratadas para reducir el grado de presión hídrica de la cuenca.

Entre los beneficios de tipo social se encuentran: proteger la salud de los habitantes de la cuenca eliminando vectores infecciosos (moscos y roedores) y malos olores, asegurar a las localidades que se abastecen de las corrientes superficiales y subterráneas la disposición de agua de mayor calidad para el consumo humano y recuperar el espacio para la recreación y esparcimiento de las familias.

En el sentido ambiental, una aportación de este tipo de programas es preservar los sitios vitales para especies migratorias y repoblar los ríos.

Dentro de las acciones concretas que se toman para llevar a cabo el saneamiento de una cuenca hidrológica se encuentran:

- ✓ Construcción de nuevas plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) y estaciones de bombeo.
- ✓ Realizar acciones de saneamiento autónomo de las comunidades rurales.
- ✓ Revisar y establecer, en coordinación con los H. Ayuntamientos, nuevos sitios para los basureros urbanos y a cielo abierto de las localidades grandes de la cuenca.
- ✓ Establecer un programa de empleo temporal con los municipios, bajo la coordinación de la SEDESOL, para la limpieza de cañadas, barrancas y riberas de la cuenca, ejecutado con mano de obra campesina en la época de secas de cada año.
- ✓ Mejorar el saneamiento de los campamentos de jornaleros agrícolas temporales en lo referente a letrinización, basureros y disposición de aguas grises.
- ✓ Mantener actualizado el padrón de descargas de los diferentes usos del agua en la cuenca.
- ✓ Realizar un efectivo monitoreo permanente de la calidad del agua en las descargas de los diferentes usos del recurso en la cuenca.
- ✓ Concertar con los acuicultores de la cuenca la búsqueda de procedimientos de descargas de sus aguas residuales que atemperen sus efectos de eutricación a los cuerpos de aguas receptores.
- ✓ Inspeccionar la vigilancia del cumplimiento de la normatividad del uso de agroquímicos ante las autoridades correspondientes.
- ✓ Normar a nivel municipal el establecimiento de depósitos para residuos sólidos y vigilar su aplicación.
- ✓ Conocer los procesos de la contaminación y sus impactos ambientales, económicos y sociales, para poder sustentar la protección de las aguas y la toma de decisiones.

- ✓ Iniciar un programa de investigación para la remoción o fijación de los contaminantes presentes, mediante el establecimiento de una zona de inundación con vegetación natural de la región.
- ✓ Realizar estudios de prospección con modelos de simulación, que permitan conocer y evaluar el desarrollo de la contaminación a futuro, para tomar las decisiones y medidas precautorias o correctivas necesarias.
- ✓ Determinar el gasto ecológico, según la fracción XXII del Artículo 2° del Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales y cuidar que se cumpla con dicho volumen en la extracción anual de las presas.
- ✓ Establecer la adopción de compromisos y un cambio de actitud promovido mediante un programa de participación social y comunitaria, ya que el éxito de este tipo de programas depende de la participación de la ciudadanía, sociedad organizada y usuarios del agua.
- ✓ Establecer que el principal objetivo del programa de saneamiento es recuperar la calidad ambiental de la región y mejorar la calidad de vida de los habitantes de la cuenca.
- ✓ Establecer el compromiso social e institucional de conciliar el actual y futuro desarrollo económico de la región con el aprovechamiento de los recursos hídricos de la cuenca.
- ✓ Establecer lugares de recreación familiar en los puntos que las autoridades de los municipios y ciudadanía determinen
- ✓ Para asegurar la sostenibilidad de estas obras la amortización de las mismas se hará vía tarifa por los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento que prestan las juntas municipales de agua potable y alcantarillado a los habitantes de las localidades beneficiadas.
- ✓ El mecanismo de financiamiento se logra con recursos de los programas operativos a cargo de la CNA, de los gobiernos estatales y de los municipios de la cuenca, aunado con la inversión de los particulares.

6.2.4 Salud Ambiental

Según la OMS se define salud como el estado de completo bienestar físico, mental y social ⁽¹³⁾, desafortunadamente, ante esta definición muy poca gente podría considerarse saludable. En términos prácticos se explorarán las causas que afecten el bienestar físico con síntomas clínicos reconocibles o decrementos en el desempeño humano. Los efectos de salud se dividen en dos categorías: mortalidad y morbilidad, que corresponden al número de muertes por unidad de población por unidad de tiempo y número de casos no fatales de enfermedades reportables, respectivamente.

Existen algunos contaminantes de efecto limitado y poco alcance como algunas partículas sedimentables o colores, algunos otros son perjudiciales, pero de efecto transitorio como la temperatura y la materia putrescible que es responsable de la disminución de oxígeno, pero que finalmente termina por descomponerse desapareciendo así los efectos causados al medio. Sin embargo, existen otros contaminantes, que llevan prácticamente a la destrucción del medio acuático y representan graves peligros para las personas que pudieran consumir estas aguas y/o sus productos, dado que persisten en el medio por tiempos prolongados, tales como: metales pesados, algunos plaguicidas, cianuros, arsénico, hidrocarburos y fenoles.

De los metales pesados, destacan el plomo, cadmio y mercurio, de elevada toxicidad y bioacumulables. Entran a la cadena alimenticia del ser humano a través de los organismos acuáticos que los acumularon y causan en éste ceguera, amnesia, raquitismo, miastenia o hasta la muerte. El plomo provoca alteraciones hematológicas y saturnismo (enfermedad que engloba trastornos nerviosos, digestivos y renales). El cadmio provoca en el hombre daños al aparato digestivo y renal, así como problemas de huesos, descalcificación y lesiones de la médula ósea; llega a inhibir algunos sistemas enzimáticos y por inhalación provoca lesiones pulmonares. El mercurio provoca alteraciones en la mucosa intestinal, inhibición de ciertas enzimas, en mujeres

embarazadas puede causar efectos teratogénicos graves, daños celulares que pueden llevar a alteraciones genéticas, lesiones renales y del sistema nervioso.

Los plaguicidas tras ser lavados de los suelos de cultivo y llegar a los ríos y mares, donde se acumulan en los organismos acuáticos pueden ser consumidos por el hombre. Otra ruta de consumo son alimentos y por inhalación o contacto con polvos que contienen residuos de éstos. La agresividad de los plaguicidas, está en función de su persistencia y de la susceptibilidad de ser acumulados por los organismos que los absorben. Se piensa que algunos de ellos pueden ser cancerígenos, teratogénicos y mutagénicos, aunque aún no se tiene evidencia suficiente. Tienen efectos adversos en el sistema endócrino.

Los cianuros aunque no son muy persistentes en el medio, son sumamente tóxicos, debido a que inhiben el sistema citocromo oxidasa y ocasionan la muerte de las células al impedir la respiración. Se ha visto que los cianuros potencializan su toxicidad al mezclarse con sales de zinc o de cadmio y disminuyen su toxicidad al mezclarse con sales níquel o cobre en medios neutros o alcalinos. Existe una relación inversa entre la concentración de oxígeno en el agua y la toxicidad del cianuro, por el contrario, guarda una relación directa con la temperatura del agua.

El arsénico se conocía desde la antigüedad como un “veneno”, actualmente se sabe que se combina con los grupos sulfhidrilos de las enzimas e interfiere en el metabolismo celular, en el hombre produce lesiones digestivas, alteraciones de la piel, lesiones dérmicas, vasculopatías periféricas ("enfermedad del pie negro"), además de enfermedades respiratorias, neurológicas, cardiovasculares y diversos tipos de cáncer: pulmón, riñón, hígado, vejiga y piel. Tras la ingesta prolongada de arsénico inorgánico, vía agua de bebida, se puede presentar hiperqueratosis palmo - plantar cuya manifestación principal es la pigmentación de la piel y callosidades localizadas en las palmas de las manos y pies. El arsénico puede provocar la muerte, en los supervivientes

se ha observado depresión de la médula ósea, hemólisis, hepatomegalia, melanosis, polineuropatía y encefalopatía.

A pesar de que algunos resultados han sido negativos, el valor demostrativo en conjunto indica que el arsénico puede provocar daños clastogénicos en diferentes tipos de células con distintos efectos finales en las personas expuestas y en los enfermos de cáncer.

Algunos derivados de los hidrocarburos como los bifenilos policlorados son solubles y acumulables en los tejidos grasos, son una fuente potencial de agentes teratogénicos, estimula las enzimas del hígado que descomponen las hormonas sexuales, causan lesiones hepáticas, náuseas, vómito, pérdida de peso, edema y dolor abdominal.

Los fenoles presentan una relación inversa entre la concentración de oxígeno en el agua y su toxicidad, debido a que mínimas concentraciones de fenoles imprimen al agua un sabor y olor desagradables no es consumida por seres humanos, pero esto no garantiza que no se consuman sus productos. Los fenoles causan irritación por contacto a los ojos, piel, tracto respiratorio y digestivo.

Si bien es cierto que los contaminantes descritos anteriormente son residuos de industrias y fábricas que elaboran productos que el ser humano necesita para mantener una buena calidad de vida, también es cierta la necesidad de darles un tratamiento adecuado porque además de las enfermedades somáticas que provocan en el ser humano, la contaminación también tiene repercusiones psíquicas al hacer que el hombre viva en un ambiente plagado de ruidos, olores, luces y compuestos que naturalmente no debieran estar presentes en él. Por ejemplo, aunque todavía son insuficientes los estudios médicos de los efectos que tienen los malos olores en la salud, se sabe que disminuyen el apetito, producen dificultades respiratorias, náuseas, vómito y algunos problemas digestivos; así mismo provocan algunos trastornos mentales como manías leves, histeria y mal humor.

Los olores intensos provocan cefaleas, anosmia y una variedad de reacciones alérgicas. Económicamente hablando, los malos olores frenan el desarrollo urbano y turístico y hacen declinar el valor de los inmuebles localizados en las zonas afectadas. ⁽¹²⁾

6.2.5 Enfermedades transmitidas por el agua

Las enfermedades transmitidas por el agua son enfermedades producidas por el agua que se ha contaminado con desechos humanos, animales o químicos. Algunas enfermedades transmitidas por el agua son: cólera, fiebre tifoidea, shigella, poliomielitis, meningitis y hepatitis A y E. Las concentraciones excesivas de nitratos causan trastornos sanguíneos. Plaguicidas como el DDT y el heptaclor, causan cáncer y también pueden causar recuentos bajos de espermatozoides y enfermedades neurológicas, además de que se han encontrado en la leche materna de mujeres que han estado en contacto con éstos. ⁽⁸⁾

6.2.6 Enfermedades con base en el agua

En las enfermedades con base en el agua los causantes son organismos acuáticos que pasan parte de su ciclo vital en ella y otra parte como parásitos de animales. Estos organismos pueden prosperar en aguas de cualquier calidad. Como parásitos, generalmente toman forma de gusanos y se valen de vectores animales intermediarios como los caracoles para prosperar, luego infectan directamente al hombre, penetrando a través de la piel o al ser tragados por éste. Algunas enfermedades con base en el agua son: la dracunculosis, causada por el gusano de Guinea; paragonimiasis, clonorquiasis y esquistosomiasis. Los causantes de estas enfermedades son una variedad de gusanos tremátodos, tenias, vermes cilíndricos y nemátodos vermiformes, denominados colectivamente helmintos, que infectan al hombre. Aunque estas enfermedades generalmente no son mortales, pueden ser extremadamente dolorosas e impiden trabajar a quienes las padecen, e incluso a veces impiden el movimiento. ⁽⁸⁾

6.2.7 Enfermedades de origen vectorial relacionadas con el agua

Millones de personas sufren de infecciones transmitidas por vectores (insectos u otros animales capaces de transmitir una infección, como los mosquitos y las moscas tsetsé) que se crían y viven cerca de aguas contaminadas y no contaminadas. Esos vectores infectan al hombre con paludismo, fiebre amarilla, dengue, enfermedad del sueño, filariasis y oncocercosis.⁽⁸⁾

6.2.8 Enfermedades vinculadas a la escasez de agua

Se considera que muchas otras enfermedades, inclusive el tracoma, lepra, tuberculosis, tos ferina, tétanos y difteria, están vinculadas a la escasez de agua porque prosperan en condiciones de escasez de agua y saneamiento deficiente. Las infecciones se transmiten cuando se dispone de muy poca agua para lavarse las manos. Estas enfermedades, galopantes en la mayor parte del mundo, pueden controlarse eficazmente con mejor higiene, para lo cual es imprescindible tener agua adecuada.

Algunas enfermedades parasitarias que generalmente no se consideran relacionadas con el agua y cuyo alcance era anteriormente limitado han estado extendiéndose rápidamente con el aumento de la población y la contaminación de los suministros de agua, como sucedió con la cisticercosis, una enfermedad habitualmente producida por las tenias que se encuentran en la carne poco cocinada del cerdo, que se extendió rápidamente en la ciudad de México a principios de los años ochenta, cuando el parásito se multiplicó en el agua sumamente contaminada del río Tula, que suministra gran parte del agua para beber de los asentamientos precarios de las afueras de la ciudad.⁽⁸⁾

6.2.9 Estadísticas de enfermedades provocadas por el agua⁽⁷⁾

✿ 5 millones de personas, fallecen anualmente a causa de enfermedades transmitidas por medio del agua. (OMS)

- ✿ Alrededor del 80 por ciento de todas las enfermedades y más de una tercera parte de todas las muertes en los países en desarrollo están relacionadas con el agua.
- ✿ Unos 6.000 niños mueren diariamente por enfermedades relacionadas con el consumo de agua sin las necesarias condiciones de salubridad. Además, se estima que un 80% de todas las enfermedades que se registran en el mundo en desarrollo está provocado por esa ausencia de agua potable. (ONU)
- ✿ La OMS calcula que la morbilidad (número de casos) y mortalidad (número de muertes) derivadas de las enfermedades más graves asociadas al agua se reduciría entre un 20 y un 80 por ciento garantizando su potabilidad y adecuada canalización.
- ✿ La esquistomiasis mata cada año a unas 20.000 personas, según la OMS, que se contrae al lavarse o bañarse en ríos, lagos o canales infectados. Un gusano denominado esquistosoma penetra por la piel, llega a la sangre y se instala en los vasos sanguíneos de los intestinos o la vejiga causando, por ejemplo, un tipo de cáncer de vejiga que es la principal causa de muerte para los hombres menores de 44 años en Egipto.
- ✿ Unos 200 millones de personas de Asia, Africa y Latinoamérica sufren giardiasis, una infección intestinal que se transmite sobre todo por el consumo de agua contaminada por heces. Causa diarrea, dolores abdominales y pérdida de peso. Cada año se registran unos 500.000 nuevos casos, la mayoría en niños.
- ✿ En Estados Unidos, las enfermedades provocadas por microorganismos transmitidos por el agua disminuyeron a una milésima parte durante el último siglo. Aun así, la Agencia de Protección Ambiental de E.U.A. calcula que las enfermedades infecciosas transmitidas por el agua cuestan al país unos 9.700 millones de dólares al año.
- ✿ Las enfermedades relacionadas al agua podrían reclamar más de 76 millones de vidas, muchas más que el pandémico global del SIDA, si no se toma las debidas acciones.

6.3 Contaminación por pesticidas

6.3.1 Pesticidas

Los pesticidas son compuestos destinados a combatir plagas, están categorizados según el grupo de organismo al que van dirigidos, por ejemplo insecticidas para combatir insectos, sin embargo, no tienen una acción 100% selectiva sobre tales organismos y afectan muchos otros.

Los pesticidas organoclorados como el pentaclorofenol, detectado en agua de pozo del municipio de Atlixco, Puebla en una concentración de 1.3 ppm ⁽⁹⁾; son de alta toxicidad para los seres humanos, animales y organismos acuáticos, además de estar entre los productos fitosanitarios restringidos y/o prohibidos en el comercio internacional ⁽³⁾. Los rastros de éstos en el agua generalmente provienen de descargas de desechos industriales o de la aplicación de pesticidas en el suelo.

6.3.2 Identificación y descripción del problema

Los pesticidas se han utilizado como medio de combate contra plagas, sin embargo, en consecuencia se sigue observando la actual resistencia de varios insectos hacia ellos, deficiencias en la reproducción de algunas plantas, disminución de especies vegetales y animales, así como su persistencia en el agua, suelo y organismos vivos ⁽²⁾ aún cuando oficialmente han dejado de ser utilizados.

El suelo está dividido en dos estratos, la zona de raíces y la zona vadosa o porosa, bajo la cual se encuentra el manto acuífero sobre el cual viaja el agua hacia cuerpos de agua mayores. Este medio poroso se caracteriza por la acumulación de varias sustancias como silicatos, óxidos de hierro y aluminio, sulfato de calcio, carbonato de calcio y aire, que pueden alcanzar esta zona como consecuencia de un lavado de la zona de raíces o formarse por reacciones de oxidación. En esta zona casi no hay evaporación, toda el agua que la alcanza, se percuera hasta el acuífero formando el nivel freático. ⁽¹⁷⁾

Del mismo modo, los pesticidas son percolados al manto acuífero a través del medio poroso, llamado zona vadosa intermedia del suelo, que está en contacto con los mantos freáticos, es por ello que aparecen en los pozos. Estos compuestos se mueven a diferentes velocidades a través del suelo y existen algunos efectos de atenuación de la concentración del pesticida mientras se mueve por éste, tales como: volatilización, hidrólisis, dilución, biodegradación, adsorción, oxidación química y sedimentación. ⁽¹⁷⁾

La textura del suelo gobierna el pasaje del agua a través de éste, en suelos arenosos de poros gruesos y baja o nula reactividad, el agua se mueve más rápidamente que en suelos finos ricos en arcillas debido a que sus pequeños poros dificultan el paso del agua, además de que son altamente reactivos. La importancia de la zona vadosa del suelo radica en que determina el comportamiento de los contaminantes que se encuentren en ella, definiendo así, las oportunidades y opciones de disminuir o eliminar esta contaminación. Los últimos avances en este tipo de estudios buscan identificar opciones creativas y económicamente factibles para evitar que los contaminantes lleguen al manto acuífero. ⁽¹⁸⁾

6.3.3 Pentaclorofenol

Sustancia química que existe como cristales incoloros. El pentaclorofenol que se encuentra en sitios de residuos peligrosos es gris oscuro a pardo y existe como polvo, granos o escamas. Los seres humanos generalmente están expuestos a este tipo de pentaclorofenol.

El pentaclorofenol tuvo amplio uso como pesticida y para preservar madera, pero desde 1984, la compra y el uso de pentaclorofenol ha sido restringida a individuos autorizados. Ya no está disponible para uso por el público en general. Todavía se usa industrialmente como preservativo para madera en postes de empresas de servicio público, rieles de ferrocarriles y pilotes de muelles.

Se le puede encontrar en el aire, el agua, y el suelo. Entra al medio ambiente por evaporación desde la superficie de maderas tratadas, derrames industriales y por disposición en sitios de residuos no controlados. El tiempo que tarda en ser degradado a otros productos químicos por la luz solar, por otras sustancias químicas y por microorganismos va desde unos pocos días hasta meses. Se encuentra también en peces y en otros alimentos, sin embargo, los niveles son generalmente bajos.

6.3.3.1 Efectos sobre la salud humana

La población general puede estar expuesta a niveles de pentaclorofenol muy bajos en el aire del interior de viviendas y en el aire libre, en alimentos y en el agua potable y el suelo. La gente que trabaja o vive cerca de lugares donde aún se utiliza este compuesto y la gente que vive cerca de sitios de residuos peligrosos.

La EPA ha establecido un límite máximo para pentaclorofenol en agua potable de 1 ppb ⁽⁵⁾ La Administración de Salud y Seguridad Ocupacional (OSHA) ha establecido un límite de 0.5 miligramos de pentaclorofenol por metro cúbico de aire en el trabajo ($0.5\text{mg}/\text{m}^3$) durante jornadas diarias de 8 horas, 40 horas a la semana. ⁽⁶⁾

Estudios en trabajadores han demostrado que la exposición a altos niveles de pentaclorofenol puede hacer que las células en el cuerpo produzcan demasiada energía calórica. Cuando esto ocurre, una persona puede exhibir una fiebre muy alta, sudor profuso y dificultad para respirar. La temperatura corporal puede subir a niveles peligrosos, causando daño a varios órganos y tejidos, y aun la muerte. En seres humanos expuestos a altos niveles de pentaclorofenol por largo tiempo también se han observado efectos al hígado y daño al sistema inmunológico. En animales de laboratorio expuestos a altas dosis de pentaclorofenol se ha observado daño de la tiroides y el sistema reproductivo. Es irritante para las membranas mucosas y la piel. El principal mecanismo de acción tóxica es el incremento del metabolismo oxidante. ⁽⁴⁾

Algunos estudios han observado un aumento en el riesgo para contraer cáncer en trabajadores expuestos a pentaclorofenol por un tiempo prolongado. La EPA lo clasifica dentro del grupo de cáncer B2, lo cual significa que es un probable agente cancerígeno en base a suficiente evidencia en animales, pero aún no es suficiente o es inadecuada la evidencia en humanos ⁽⁵⁾ y la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) lo considera posiblemente carcinogénico en seres humanos. ⁽⁴⁾

Existen exámenes disponibles para medir el pentaclorofenol y sus productos de degradación en la sangre, la orina y los tejidos corporales. Debido a que el pentaclorofenol es eliminado del cuerpo relativamente rápido, estos exámenes son de más utilidad para detectar exposiciones que ocurrieron recientemente, no indican a cuanto pentaclorofenol se estuvo expuesto y no pueden usarse para predecir si sufrirá efectos tóxicos o la naturaleza o severidad de estos efectos.

6.3.4 Carbendazim

Carbendazim es el nombre común de un pesticida utilizado como agente activo de muchos productos fitosanitarios, su nombre químico es metil-bencimidazol-2-ylcarbamato y le ha sido asignada clase III (NoPeligroso) por la Organización Mundial de la Salud (OMS). No es irritante a la piel ni a las membranas mucosas y tiene un DL₅₀ de 15000 mg/kg por vía oral y un DL₅₀ de 2000 mg/kg por vía cutánea. Presenta baja toxicidad en aves; en organismos acuáticos, se han identificado mortalidad, problemas genéticos, problemas de reproducción y comportamiento e intoxicación entre otros a causa de este pesticida. Aún no se tiene evidencia suficiente para considerarlo contaminante de aguas subterráneas.

6.3.4.1 Efectos sobre la salud humana

Es ligeramente tóxico, y se sospecha que puede ser agente cancerígeno y disruptor endócrino. No se cuenta con suficiente información en cuanto a toxicidad en reproducción y desarrollo.

6.3.5 Paraquat

Es el es el segundo herbicida de uso más generalizado en el mundo, constituye el 40 por ciento de todos los plaguicidas. En México ocupa el segundo lugar en uso. Su nombre químico es 1,1'-dimetil-4,4'-bipiridinio. El paraquat es un herbicida no selectivo, que mata las células de las plantas verdes al entrar en contacto. Se utiliza para el control de malezas en la fruticultura, en las tierras de cultivos no agrícolas y en las cosechas de las plantaciones, incluyendo café, cacao, coco, palmeras de aceite, caucho, banano y té. El paraquat es persistente y se acumula en la tierra tras aplicaciones repetidas. Debido a su aguda toxicidad $DL_{50} = 57 \text{ mg/kg}$, está prohibido en Austria, Dinamarca, Finlandia y Suecia.

6.3.5.1 Efectos sobre la salud humana

Se absorbe por la vía digestiva y por inhalación. Si llega a los pulmones, produce congestión, edema alveolar con aumento de macrófagos que progresa a fibrosis y edema pulmonar, los cuales se presentan hasta 14 días después de la exposición si el afectado no recibió tratamiento oportuno y correcto.

Se dirige fundamentalmente a los pulmones y genera ahí radicales libres oxidantes; por eso, en los casos de intoxicación aguda está totalmente contraindicado usar oxígeno. La inhalación de gotitas puede irritar las vías respiratorias superiores y producir sangrado nasal. La intoxicación aguda puede lesionar diversos órganos como: riñón, hígado, corazón, tracto gastrointestinal e, incluso, causar hemorragia cerebral. Las lesiones oculares van desde conjuntivitis hasta opacidad de la córnea. No existe antídoto conocido. Está clasificado como posible agente mutagénico y cancerígeno.

En su forma concentrada lesiona los tejidos con los que se pone en contacto. Deja la piel de las manos seca y fisurada y puede ocasionar deformidades y estriaciones blanquecinas de las uñas y caída de ellas. El contacto prolongado con la piel produce

ampollas y ulceraciones con la subsecuente absorción de la sustancia en cantidades suficientes como para causar una intoxicación sistémica.

La lesión hepática puede ser lo suficientemente severa como para causar ictericia, aunque la hepatotoxicidad raramente es un determinante del resultado final de la intoxicación. La lesión renal se refleja en proteinuria, hematuria, elevación de la urea y la creatinina. La oliguria o anuria indican necrosis tubular aguda.

La alteración de los gases arteriales precede la sintomatología pulmonar. Dos a cuatro días después de la ingestión de la sustancia, aparecen progresivamente: tos, disnea y taquipnea, aunque pueden presentarse aún 14 días después de la exposición. La disnea severa y la cianosis progresiva reflejan el deterioro del intercambio gaseoso en el pulmón. La disnea es la manifestación clínica más temprana de la lesión pulmonar por paraquat. Usualmente, la muerte va precedida de coma.

6.3.6 Tratamientos de depuración de agua para remoción de pesticidas

6.3.6.1 Adsorción en Carbón Activado Granular

El carbón activado granular (CAG) es el adsorbente industrial más importante. La estructura de sus poros puede controlarse durante el proceso de manufactura para la adsorción óptima de ciertos compuestos. Las formas amorfas del carbón incluyen el carbón negro, las fibras de carbón y los carbones porosos, todos ellos se obtienen al calentar o quemar, bajo condiciones controladas, materiales carbonosos tales como el carbón, las cáscaras de coco, la madera, la turba, el lignito y el petróleo. El material carbónico es generalmente sólido y de origen natural.

Los carbones porosos se obtienen como un residuo después de extraer los componentes volátiles de los materiales carbónicos mediante un proceso termal (de

calcinación) por ausencia del aire. Los productos más importantes son el coque y el carbón vegetal o animal, que proveen la materia prima para el carbón activado.

La adsorción es el proceso mediante el cual las moléculas de los fluidos se adhieren a la superficie por fuerzas químicas o físicas (o una combinación de ambas). La acumulación o aglomeración de sustancias disueltas en la superficie de un sólido adsorbente provoca la clarificación del agua. En la adsorción física, las fuerzas Van der Waals de bajo nivel dejan las impurezas en la superficie del carbón en la adsorción química utilizando carbones impregnados, las fuerzas son relativamente fuertes y ocurren en los lugares impregnados de la superficie.

Varios factores pueden afectar la adsorción: la distribución del tamaño de los poros, el tamaño molecular de la impureza, tamaño de la partícula de carbón, temperatura del tratamiento del carbón, y el pH de la solución. Sin embargo cuando las otras variables se mantienen constantes, las siguientes situaciones producen:

- La eficiencia de la adsorción aumenta cuando el tamaño de la partícula de carbón disminuye.
- La eficiencia de la adsorción aumenta cuando la temperatura disminuye.
- La eficiencia de adsorción aumenta cuando la solubilidad del contaminante disminuye.
- La eficiencia de la adsorción aumenta cuando el tiempo de contacto aumenta.

En el transcurso de la operación, la capacidad de adsorción del carbón va disminuyendo, de tal forma, que necesita ser regenerado en un límite definido tecnológica y económicamente. Cuando el carbón activado ha sido cubierto por la materia adsorbida y la concentración de esta es ya muy alta, puede ser regenerado, lo cual significa que su capacidad de adsorción puede ser restituida mediante la desorción

de las sustancias acumuladas que se logra mediante la aplicación de las fuerzas que contrarresten la adsorción, como por ejemplo la introducción de energía al sistema.

Existen varios métodos de desorción:

1. Regeneración térmica donde se aplican altas temperaturas (750 –1000 °C) para quemar las sustancias acumuladas, con la adición simultánea de gases de oxidación para reactivar los poros del material adsorbente.
2. Regeneración química donde se usan solventes y oxidantes, como por ejemplo ácido sulfúrico concentrado. La selectividad del solvente y el alto costo no han permitido hasta ahora, su aplicación a nivel industrial.
3. Regeneración biológica donde se usa el carbón activado y formas de lúpulo biológico en los gránulos de las sustancias adsorbentes durante la purificación de agua residual. Este método aun se está probando y se obtiene una capacidad de adsorción muy baja comparada con la del carbón nuevo.

Prácticamente, la regeneración se lleva a cabo solamente por el proceso térmico en el cual el carbón se trata en un horno de varios pisos, frecuentemente de tipo tambor o de lecho fluidizado a temperaturas entre los 750 y 950°C. Puede ser regenerado in situ con un ciclo de reuso continuo.

El uso de carbón activado granular ha sido propuesto por la EPA para eliminar o reducir sustancias orgánicas potencialmente carcinogénicas en el suministro público. El carbón activado se aplica exitosamente para la purificación total o suplementaria de agua potable y residual, gracias a su muy desarrollada estructura porosa y su gran superficie específica presenta una considerable capacidad de adsorción de varios contaminantes, tanto orgánicos como inorgánicos.

El diseño del proceso de adsorción en carbón activado a nivel industrial directamente puede ser muy tardado y generar altos costos por los gastos de estudios de

planta piloto, por lo tanto, se utiliza un estudio en minicolumnas que no requiere el uso de modelos complicados, pero se basa en los modelos de transferencia de masa de lecho fijo. Posteriormente se hace el escalamiento tomando en cuenta el tamaño de partícula, la carga hidráulica y el tiempo de contacto de lecho vacío de las minicolumnas. Además de esta forma se necesita menor cantidad de agua que puede ser transportada con facilidad al laboratorio donde deben realizarse las pruebas. El proceso de escalamiento debe verificarse tanto por el modelo de cálculos como por los datos experimentales.

El principio de estudio en minicolumnas se basa en asumir que al reducir la escala (diámetro de partícula y de columna), de acuerdo con varias ecuaciones matemáticas, el punto de rompimiento (breakthrough) de la curva resultante de las minicolumnas es similar a la que resultará en condiciones prácticas. Esto significa, que en teoría, la vida del carbón en la práctica puede ser predicha mediante un experimento en minicolumnas de más o menos dos semanas.

Existen algunos problemas al evaluar la vida del carbón en una situación de minicolumnas, como por ejemplo la biodegradación que no se refleja o el efecto de precarga que no se puede predecir muy correctamente. Sin embargo, estas predicciones son una herramienta ideal para desarrollar experimentos en un período corto, es posible evaluar varias posibilidades de incrementar la vida del carbón, investigar diferentes tipos de adsorbentes competitivos, determinar la influencia de la reactivación en la vida del carbón y correlacionar la vida del carbón con los contaminantes y las propiedades del adsorbente.

6.3.6.2 Otras formas de remoción de pesticidas

Algunos estudios se han dirigido hacia la búsqueda de adsorbentes más económicos probando su eficiencia, entre los materiales propuestos se encuentra la corteza de pino o los desechos de biomasa vegetal, en específico se probó la adsorción de paraquat en la fracción aislada de aguas residuales de un molino de aceite de oliva

llamado polimerín que podría resultar efectivo en remediación de agua con metales tóxicos o pesticidas iónicos por sus propiedades polielectrolíticas. Se ha observado la adsorción de 90g de paraquat por kg de bioadsorbente a pH de 5.5. ⁽²²⁾

6.4 Contaminación por arsénico

6.4.1 Arsénico

El arsénico es un elemento natural ampliamente distribuido en la corteza terrestre. En el medio ambiente, se encuentra combinado con oxígeno, cloro y azufre formando compuestos inorgánicos de arsénico. En animales y en plantas se combina con carbono e hidrógeno formando compuestos orgánicos de arsénico.

Los compuestos inorgánicos de arsénico se usan principalmente para preservar madera. Los compuestos orgánicos de arsénico se usan como pesticidas, principalmente sobre plantas de algodón.

6.4.2 Identificación y descripción del problema

El arsénico es un elemento que se encuentra de forma natural en el planeta, sin embargo, provoca serios problemas de salud a los seres humanos en exposiciones superiores a las que marcan los límites permisibles. Si a la existencia natural del arsénico se suman las fuentes de contaminación antropogénica, existen varios puntos de riesgo para los seres humanos que deben ser debidamente controlados, en los centros de trabajo y en el suministro de agua para uso y consumo humano, por ejemplo.

La EPA ha establecido límites un límite de 0.01 ppm para arsénico en agua potable, mientras que la normatividad oficial mexicana (NOM-127-SEMARNAT-1999) ha establecido un límite de 0.05 ppm.

Se ha encontrado arsénico en el agua de algunos pozos del estado de Hidalgo, razón por la cual, muchos de ellos han sido cerrados. El caso particular de estudio se centra en uno de estos pozos cerrados localizado en Zimapán, en el cual se encontró una

concentración de 1.28 ppm de As, valor que supera por mucho los límites máximos permisibles nacionales e internacionales. Este pozo tenía un gasto de explotación de 38 lps (1'198,368 m³/año) y beneficiaba a 18,000 habitantes. Si consideramos que la CNA marca al estado de Hidalgo como un estado con problemas de sequía resulta muy importante la remediación de estas fuentes de agua, ya que beneficiarían a mucha gente.

6.4.2.1 Contaminación Natural

El arsénico está presente en más de 200 especies minerales, de las cuales la más común es la arsenopirita. Se estima que alrededor de un tercio del flujo atmosférico de arsénico es de origen natural. La actividad volcánica es la fuente natural más importante de arsénico, seguida de la volatilización a baja temperatura. En el agua freática utilizada como agua de bebida en varias partes del mundo, hay arsénico inorgánico de origen geológico.

El arsénico no puede ser destruido en el medio ambiente, solamente puede cambiar de forma; así el arsénico presente en el aire se deposita en el suelo o es arrastrado por la lluvia. Muchos de los compuestos de arsénico pueden disolverse en agua y éste puede acumularse en peces y mariscos.

Las aguas subterráneas pueden tener relación con ambientes geoquímicos que requieren la presencia de piritita y arsenopirita entre sus constituyentes minerales y medios reductores. En este tipo de ambiente el arsénico inorgánico se moviliza en forma de trióxido de arsénico (As₂O₃). Las capas de piritita de los pozos subterráneas se ponen en contacto con el oxígeno y, al impulsar el agua desde el interior del pozo, se solubiliza el arsénico. Las grandes presiones y temperaturas a que quedan sometidas las aguas subterráneas profundas pueden originar un medio reductor con incorporación del arsénico al agua subterránea.

6.4.2.1 Contaminación Antropogénica

La presencia de arsénico en las aguas subterráneas también se puede explicar como resultado de la utilización de productos como fungicidas, insecticidas y plaguicidas; relacionados con actividades agrícolas, de jardinería y de limpieza de malezas, ya que muchos de ellos tienen arsénico como compuesto tóxico, para erradicar plagas diversas. La contaminación del aire y la presencia de residuos peligrosos es causa del aumento del arsénico en el ambiente.

La extracción y fundición de metales no ferrosos y la utilización de combustibles fósiles son los principales procesos industriales que contribuyen a la contaminación antropogénica del aire, el agua y el suelo con arsénico. El uso del arsénico en la conservación de la madera también ha llevado a la contaminación del medio ambiente.

6.4.3 Tratamientos de depuración de agua para remoción de arsénico ⁽²⁴⁾

Debido a que el As^{+5} se remueve más fácilmente que el As^{+3} , el tratamiento se inicia con la oxidación con cloro, hipoclorito de calcio o permanganato de potasio. Existen varios tratamientos para la remoción de arsénico del agua, tales como:

Adsorción (descrita en el apartado 6.3.6.1) en carbón activado, zeolitas, sílica, arena verde de manganeso, fierro, óxido de fierro, lodo rojo activado, itrio y lantano. Se han utilizado también algunos biopolímeros como quitina y quitosán.

Tratamientos con adición de sales de fierro y aluminio, que presentan inconvenientes al ser muy alta la dosis de coagulante requerida para reducir el arsénico a un nivel aceptable, originando grandes cantidades de lodos, que a su vez deben ser tratados y dispuestos adecuadamente. Adicionalmente se ha relacionado al aluminio con la enfermedad de Alzheimer, por lo cual no representa una opción viable.

Algunos estudios identifican los minerales que contienen óxidos de hierro como adsorbentes alternativos de arsénico. Algunos logran, incluso, una eficiencia de hasta 100 % en su remoción, siempre y cuando se controle el pH entre 6.0 y 7.0 para evitar la solubilización del hierro.

Se ha utilizado también ósmosis inversa, para eliminar las sustancias disueltas presentes en el agua, forzando la circulación del agua por una membrana semipermeable bajo una presión superior a la osmótica. Tiene una eficiencia de más de 95 %, su rendimiento se ve afectado principalmente por la turbiedad, hierro, manganeso y sílice.

En los sistemas de intercambio iónico, los iones de una especie dada son desplazados de un material insoluble de intercambio (resina) por otros iones que se encuentran en solución. Remueve efectivamente el arsénico en el intervalo de pH entre 8 y 9. No obstante, el selenio, fluoruro, nitrato y sólidos disueltos totales compiten con el arsénico y afectan la duración del proceso. Las consideraciones que se tiene en este proceso comprende el pH, iones competitivos, tipo de resina, alcalinidad, concentración de arsénico en el afluente, disposición de la resina y los regenerantes usados, efectos secundarios de la calidad del agua y los parámetros de diseño de la operación.

La nanofiltración es un proceso de separación líquida mediante membranas operadas bajo presión que permite el paso de solventes y sales monovalentes, iones metálicos y pequeñas moléculas orgánicas de peso molecular en el intervalo de 200 a 1000. Se puede remover el As^{+5} y el As^{+3} disueltos en el agua, logrando una remoción de hasta un 90% de arsénico disuelto en aguas subterráneas. Este proceso no es tan apropiado para tratar aguas superficiales debido al extensivo pretratamiento que se requiere para remover partículas sólidas o coloidales del agua. La remoción depende de los parámetros de operación, propiedades de la membrana y el estado de oxidación del arsénico.

El ablandamiento con cal remueve As^{+3} ó As^{+5} , la eficiencia de la remoción está en función del pH. Este método tiene un alto rendimiento para remover concentraciones de arsénico de 50 $\mu\text{g/L}$; sin embargo para reducir a 1 $\mu\text{g/l}$ se necesita de un tratamiento secundario. En el sistema de ablandamiento con cal se produce una considerable cantidad de lodos.

El electrotratamiento permite la movilización del arsénico disuelto en el agua por medio de electrodos de hierro que propician la adsorción de los iones presentes en este elemento. Los experimentos realizados con este método permitieron obtener eficacias superiores al 90%.

En cualquiera de los tratamientos mencionados anteriormente, es importante considerar el manejo de los residuos generados ya que éstos también van a presentar altos niveles de arsénico.

6.4.3.1 Tratamientos poco convencionales

En el caso de agua subterránea contaminada con metales (incluso fierro y arsénico de origen natural), se puede tratar in situ inmovilizándolos, esto se logra utilizando la bacteria reductora de sulfatos, que reduce los sulfatos a sulfuros lo cual permite la precipitación de los metales como sulfuros de cada metal. Para inducir la bacteria, se pone una fuente de carbón (electrodonadora) para que la bacteria crezca y para remover el oxígeno. Este tipo de tratamientos se podrían utilizar como “barreras” en los sitios de producción de los contaminantes para evitar tener que dar tratamiento a todo el agua que vaya a distribuirse. ⁽²⁵⁾

Se han hecho pruebas también de adsorción de arsénico a bajas concentraciones en pelo humano, dado que este material ha demostrado ser sumamente eficiente en la separación de aceites de emulsiones agua – aceite y que es el vehículo utilizado en una

de las pruebas médicas que se realiza cuando se quiere diagnosticar la cantidad de arsénico en el organismo humano. ⁽²⁶⁾

Se ha utilizado también la flotación por espuma para remover arsénico del agua. Este método implica interacciones entre las especies de arsénico o complejos multicatiónicos hidrolizables y surfactantes además de la remoción de los complejos hidrofóbicos formados por burbujas de aire. El sistema de experimentación consistió en pentóxido de arsénico hidratado, cloruro de aluminio, dodecilsulfato de sodio y dodecilamina; logrando una remoción de 99%, la eficiencia depende del pH, relación de arsénico:cloruro de aluminio, de las interacciones entre las especies multicatiónicas de arsénico y de los surfactantes utilizados como colectores. Los resultados mostraron que este puede ser un método nuevo y efectivo por sí mismo o en combinación con otros métodos de remoción de arsénico. ⁽²⁷⁾

6.5 Contaminación por exceso de sales de calcio y magnesio (dureza)

6.5.1 Sales naturalmente presentes en el agua

El agua naturalmente contiene sales necesarias para el crecimiento de las plantas y para el buen funcionamiento del organismo del ser humano. La composición del agua, depende de la profundidad a la que se encuentra, debido a que en su ruta hacia estratos más profundos va arrastrando minerales de las rocas, pero en términos generales, las propiedades fisicoquímicas naturales del agua son ⁽²⁹⁾:

Parámetro	Unidades	Valor
pH	μS/cm	7 - 8
Conductividad	mg/l	400
Cloruros	mg/l	25
Sulfatos	mg/l	25
Calcio	mg/l	100
Magnesio	mg/l	30
Aluminio	mg/l	0.05
Dureza	mg/l	150

Residuo seco	mg/l	750
Oxígeno Disuelto	mg/l	5

Tabla 3. Propiedades fisicoquímicas: Composición natural del agua

6.5.2 Identificación y descripción del problema

El agua de lluvia originalmente es “agua suave”, que a su paso por lagos, ríos y corrientes de agua subterránea absorbe minerales que la hacen dura. El agua denominada como “agua dura” contiene sales de calcio y magnesio, que si bien no son nocivas para el ser humano, afectan las propiedades del agua para procesos de lavado y de limpieza en general, además de presentar problemas de incrustación. En este sentido, los sistemas de tratamiento encuentran su mayor aplicación a nivel industrial, aunque a nivel doméstico aportan varios beneficios en cuestiones de limpieza y de cuidados de la piel.

Existen varias posibilidades para suavizar el agua, desde la desmineralización total que se logra mediante resinas de intercambio iónico, hasta el ablandamiento o desmineralización parcial o que consiste en remover los iones calcio y magnesio mediante resinas de ablandamiento, filtros de arena, procesos cal – carbonato, ósmosis inversa, etc.

El agua suavizada facilita las labores de limpieza, requiere menores cantidades de detergentes o jabones para lograr éste propósito y resuelve el problema de incrustación, constituyendo así un ahorro de tiempo y de dinero. Algunas de las tecnologías de tratamiento son más efectivas que otras, pero del mismo modo resultan mucho más costosas, aun así vale la pena considerarlas dado que podría ser más significativo el ahorro en consumibles como detergentes o en servicios y paros de la planta por problemas de incrustación que la inversión del sistema de suavización en sí.

6.5.3 Tratamientos de depuración de agua para remoción de sales

Dependiendo de las características del agua extraída de alguna de las fuentes de abastecimiento y del uso que se le dará se debe aplicar el tratamiento adecuado, para

garantizar la remoción de todos los contaminantes que pudieran resultar perjudiciales en una aplicación específica.

En el caso de utilizar el agua como servicio auxiliar para los sistemas de enfriamiento o para lavado, es suficiente con lograr una calidad de agua tal que cumpla con la norma NOM-127-SSA1-1994 para uso y consumo humano, sin embargo, se lograrían beneficios significativos en cuanto a consumo de detergentes y problemas por incrustación reduciendo la dureza del agua.

Mediante algunos tratamientos se logra un efluente de dureza cero, sin embargo, esta agua es corrosiva y más blanda de lo deseable para algunas aplicaciones como irrigación, por ejemplo, ya que no contiene los minerales necesarios para el adecuado crecimiento de las plantas, por lo cual suele mezclarse con agua cruda para obtener una dureza controlada.

6.5.3.1 Ablandamiento con cal – carbonato

Es uno de los métodos generales que se emplean a nivel industrial para ablandar el agua. Este proceso consiste en aplicar cal y carbonato de sodio al agua cruda. La cal reacciona con los bicarbonatos solubles de calcio y de magnesio, que son los que causan la dureza por carbonatos, formando carbonato de calcio e hidróxido de magnesio que son insolubles. El carbonato reacciona con los compuestos solubles no carbonatos de calcio y de magnesio que causan la dureza por no carbonatos, precipitando compuestos insolubles de calcio y de magnesio y dejando en solución compuestos de sodio que no consumen jabón.

Cuando se tienen grandes cantidades de magnesio, es necesario agregar cal suficiente para estabilizar el pH en 10.5 por lo menos, que es el punto de máxima precipitación del hidróxido de magnesio, después se continúa con la coagulación y sedimentación normales. Posteriormente se agrega bióxido de carbono hasta lograr un

pH de 9.5 aproximadamente, ocurriendo en este punto la máxima precipitación del carbonato de calcio seguida de una coagulación y sedimentación secundarias. Finalmente, se agrega más bióxido de carbono para disolver el carbonato de calcio que haya quedado en suspensión. ⁽²⁸⁾

En el proceso de cal – carbonato para suavizar agua dura, el Ca^{2+} se precipita como $\text{CaCO}_{3(s)}$ y el Mg^{2+} como $\text{Mg}(\text{OH})_{2(s)}$. Se emplea cal ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) y carbonato (Na_2CO_3) para reducir al $[\text{Ca}^{2+}]$ y $[\text{Mg}^{2+}]$. Consecuentemente, las constantes de solubilidad de los productos $\text{CaCO}_{3(s)}$ y $\text{Mg}(\text{OH})_{2(s)}$ controlan el proceso de ablandamiento. Estos es, cantidades estequiométricas de cal y de carbonato elevan el pH del agua de modo tal que el $\text{CaCO}_{3(s)}$ y el $\text{Mg}(\text{OH})_{2(s)}$ se encuentran en sus solubilidades mínimas.

A continuación se muestran las relaciones estequiométricas de las reacciones químicas que se llevan a cabo durante el proceso de ablandamiento:

No.	Ecuación
1	$\text{H}_2\text{CO}_3 + \text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaCO}_{3(s)} + 2\text{H}_2\text{O}$
2	$\text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^- + \text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow 2\text{CaCO}_{3(s)} + \text{H}_2\text{O}$
3	$\text{Ca}^{2+} + \text{Na}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{CaCO}_{3(s)} + 2\text{Na}^+$
4	$\text{HCO}_3^- + \text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaCO}_{3(s)} + \text{OH}^- + \text{H}_2\text{O}$
5	$\text{Mg}^{2+} + 2\text{HCO}_3^- + 2\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow 2\text{CaCO}_{3(s)} + \text{Mg}(\text{OH})_{2(s)} + 2\text{H}_2\text{O}$
6	$\text{Mg}^{2+} + \text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{Na}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{CaCO}_{3(s)} + \text{Mg}(\text{OH})_{2(s)} + 2\text{Na}^+$

Tabla 4. Reacciones del Proceso de Ablandamiento con Cal - Carbonato.

Estas reacciones son esencialmente de ajuste de pH, donde:

$$[\text{Ca}^{2+}] = C_t = [\text{H}_2\text{CO}_3] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{2-}] \quad (7)$$

y

$$[\text{Mg}^{2+}] = 2[\text{OH}^-] \quad (8)$$

A un valor de pH de 10.3, la ecuación (6) se vuelve:

$$[\text{Ca}^{2+}] = C_t \cong [\text{CO}_3^{2-}] = 10^{-4.171} \text{ M}, 2.7 \text{ mg/l} \quad (9)$$

y

$$[\text{Mg}^{2+}] = 2 \times 10^{-3.7} \text{ or } 4 \times 10^{-4} \text{ M, } 9.72 \text{ mg/l}$$

Las ecuaciones de la (1) a la (6) también muestran que debe lograrse lo siguiente antes de la adición de la cal y el carbonato:

$$[\text{Ca}^{2+}]_{\text{original}} + [\text{Ca}^{2+}]_{\text{añadido}} = C_{\text{t original}} + [\text{CO}_3^{2-}]_{\text{añadido}} \quad (10)$$

La ecuación (1) muestra la neutralización del ácido carbónico (acidez por CO_2) en el agua natural. Si el valor analítico de H_2CO_3 no está disponible, deberá calcularse porque se requiere un equivalente de cal en la reacción. La ecuación (2) es la remoción de CaCH (por sus siglas en inglés dureza por carbonatos, carbonate hardness), la ecuación (3) es la remoción de CaNCH (por sus siglas en inglés dureza por no carbonatos, no carbonate hardness). La ecuación (5) es la remoción de MgCH, mientras que la ecuación (6) es la remoción de MgNCH. Se asume que durante la operación de la planta se efectúan completamente todas estas reacciones.

Después de estos procesos, es necesario deshidratar los lodos de cal carbonato resultantes para lograr su adecuada disposición, mientras menor sea el volumen de lodos, menor será el costo. Estos lodos secan en tiempos razonables en lechos al sol, dichos lechos contienen membranas impermeables para proteger el suelo y evitar que se percuele algo a los mantos freáticos. Cuando los lodos se secan, se remueven como finas capas que se llevan a un tratamiento posterior.

Se puede recuperar la cal y los carbonatos por recalcinación. Si se encuentra presente magnesio, es necesario recarbonatar los lodos antes de deshidratarlos, lo cual se logra con una mezcla de aire – CO_2 (25/75). Segundo, los residuos sólidos se calcinan a temperaturas del orden de $871^\circ\text{-}1204^\circ\text{C}$. Un análisis típico de la cal recalcinada es:

CaO, 90.8%; MgO, 4.1%; SiO₂, 2.1%. Por cada tonelada de cal usada para el ablandamiento, se recupera de 1.2 a 1.3 toneladas de cal, por lo tanto, el exceso puede venderse para diversas aplicaciones tales como:

- Estabilizador de suelos de caminos, carreteras y aeropuertos
- Agente químico intermedio en componentes electrónicos
- Procesos de obtención de metales no ferrosos como cobre, zinc, uranio, aluminio y oro Fabricación de gabinetes de computadora, teléfonos y cables de fibra óptica
- Para construcción
- Fabricación de pinturas, espuma de bajo alfombras y algunos plásticos
- Purificación de metales para joyería
- Fabricación de papel y producción de botellas
- Como abrasivo en polvos de limpieza
- Para actividades de curtiduría, etc.

6.5.3.2 Ablandamiento con zeolitas

En este tratamiento se remueven del agua los iones de calcio y de magnesio y se sustituyen usualmente por iones sodio. Cuando la zeolita se agota, es decir, no queda más sodio en ella, debe ser regenerada pasando una solución de cloruro de sodio.

Las zeolitas naturales o “arenas verdes”, tienen capacidad para eliminar solamente de 7,000 a 12,000 gramos de dureza por metro cúbico de zeolita, mientras que las zeolitas sintéticas tienen capacidades de 20,000 a 60,000 gramos de dureza por metro cúbico de zeolita.⁽²⁸⁾

Las zeolitas naturales son de muy bajo costo y funcionan eficientemente en aguas poco turbias. Las zeolitas también son capaces de remover hierro del agua. Se colocan en unidades de filtración, generalmente a presión. Bajo condiciones normales, el efluente del filtro de zeolitas presentará una dureza de cero hasta agotar el lecho, después de lo cual, la acción ablandadora disminuye muy rápidamente. Al operar los

filtros se debe monitorear la calidad del efluente para garantizar que las zeolitas se regenerarán en el momento oportuno.

6.5.3.3 Resinas de intercambio iónico

El intercambio iónico remueve las especies iónicas, positivas y negativas, que se encuentran en solución. Durante el tratamiento del agua, la resina intercambia un H^+ o un OH^- por un catión o un anión respectivamente (dependiendo de la resina y de la carga del ión removido), lo retiene en forma temporal y lo libera cuando es regenerada.

Las resinas de intercambio iónico se encuentran disponibles como geles o lechos de macroporos, que se hacen con espaciamentos internos que incrementan el área de contacto total. Estas resinas tienen mayor resistencia a los esfuerzos físicos y químicos y usualmente tienen mayor resistencia a la incrustación orgánica.

La desmineralización total del agua, generalmente se logra en dos etapas que remueven aniones y cationes en forma separada. Primero el agua cruda se pasa por un lecho de resina catiónica ácida, donde las sales disueltas en el agua son convertidas en su ácido correspondiente por el intercambio de H^+ por los cationes. Posteriormente, este efluente se pasa por un lecho aniónico básico, que reemplaza los aniones en solución con OH^- , de tal forma que los H^+ liberados en el primer lecho, se neutralizan con los OH^- liberados en el segundo, produciendo agua purificada. Existen también lechos mixtos que realizan el doble intercambio de aniones y cationes al mismo tiempo.

Todas las resinas presentan mayor afinidad por algunos iones debido a la carga, peso molecular o concentración de iones en el agua cruda.

Cuando los lechos se han agotado, deben regenerarse con soluciones diluidas ácidas y básicas para devolverles los H^+ y OH^- cedidos. La evidencia de la necesidad de

regeneración se obtiene al detectar un incremento en la cantidad de iones del efluente que pueden evidenciarse por un aumento de conductividad. Cuando se termina la regeneración, se realiza un lavado con agua desionizada para eliminar el exceso de regenerantes en las resinas. El agua de regeneración de ambas columnas, se mezcla para neutralizarla.

Para prevenir la incrustación en los lechos de resinas el agua cruda no debe contener material coloidal o suspendido, bacterias, compuestos orgánicos, agentes oxidantes como cloro, grasas y aceites.

Como se mencionó anteriormente, el agua 100% desmineralizada no es apropiada para ciertas aplicaciones, por lo que se mezcla con agua cruda para lograr la composición necesaria.

6.5.3.4 Resinas de ablandamiento

Las resinas de ablandamiento funcionan bajo el mismo principio descrito para la resinas de intercambio iónico, de hecho, son resinas que intercambian los iones presentes en el agua por iones sodio. Estas resinas no logran la desmineralización, porque por cada ión retenido liberan un ión sodio, sin embargo, con esta sustitución consiguen ablandar el agua intercambiando los carbonatos de calcio y magnesio por carbonato de sodio, que no provoca dureza.

6.5.3.5 Filtros

Es el proceso más simple de separación, en el cual un material poroso actúa como barrera. El agua es forzada a pasar a través de este material reteniendo los sólidos disueltos. Consta de un medio filtrante, un fluido con sólidos en suspensión, una fuerza o diferencia de presión que obligue al fluido a avanzar y un dispositivo mecánico llamado filtro que sostiene el medio filtrante, contiene el fluido y permite la aplicación de la

fuerza. Este método está limitado al tamaño de las partículas a separar. Se pueden utilizar distintos medios filtrantes como arenas, arcillas, etc.

6.5.3.6 Ósmosis inversa (membranas)

Se basa en la búsqueda fundamental del equilibrio. Si dos fluidos que contienen diferente concentración de sólidos disueltos son puestos en contacto, éstos se mezclarán hasta que la concentración sea uniforme. Cuando estos fluidos están separados por una membrana semi-permeable, uno de ellos (el de menor concentración) se moverá a través de la membrana hacia el fluido que tenga una mayor concentración de sólidos disueltos. Después de un tiempo el nivel de agua será mayor a uno de los lados de la membrana. La diferencia en altura se denomina presión osmótica; aplicando en la columna del fluido una presión superior a la presión osmótica, se obtiene un efecto inverso. Los fluidos son presionados de vuelta a través de la membrana mientras que los sólidos disueltos permanecen en la columna. Usando esta técnica, se elimina la mayor parte del contenido en sales del agua

6.5.3.7 Evaporación – Condensación

Este método constituye un proceso térmico, en el cual el agua se somete a calentamiento hasta llegar a su punto de ebullición, posteriormente se colecta el vapor en un condensador para obtener agua pura. A medida que se evapora el agua de la solución y el líquido se vuelve más concentrado, es posible concentrarlo hasta el punto en que se rebasa la solubilidad de la sal. Esto provoca la precipitación, por lo común en forma de incrustaciones sobre las superficies de transferencia de calor, donde el agua es evaporada, la incrustación puede consistir en sales de calcio, magnesio y sílice. Esta incrustación disminuye mucho la velocidad de transferencia de calor, retarda la evaporación y reduce la eficiencia térmica. Para la desalinización de agua se emplea con mayor frecuencia la evaporación súbita, en la que el agua se calienta y se bombea a un tanque de baja presión evaporándose parcialmente. El proceso se repite varias veces bajo

el mismo mecanismo. Este proceso es el que naturalmente sigue el ciclo hídrico en el que se evapora el agua de la superficie terrestre para que posteriormente pueda volver a llover.