

GUÍA PARA EL MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DEL AGUA A NIVEL CASERO



Lima, 2005

Tabla de contenido

	Página
I. Introducción	4
1. Consideraciones generales	5
a) Aguas subterráneas	5
b) Aguas superficiales	5
c) Definiciones	6
2. El agua potable	8
a) Aspectos fisicoquímicos	8
b) Criterios de calidad del agua para consumo humano: las Guías de calidad para aguas de consumo humano de la OMS	8
II. Mejoramiento de la calidad del agua a nivel casero	11
A) Presencia de metales en la fuente de agua	12
1. Tratamiento de aguas con presencia de hierro y manganeso	15
1.1. Hierro	16
1.2. Manganeso	17
1.3. Remoción de hierro y manganeso	17
1.3.1. Aireación – Filtración	18
1.3.2. Oxidación – Filtración	19
2. Tratamiento de aguas con presencia de flúor	20
2.1. Flúor	20
2.2. Remoción de flúor	21
2.2.1. Hueso calcinado	21
2.2.2. Alúmina activada	22
2.2.3. Filtros caseros de intercambio iónico de bajo costo	23
3. Tratamiento de aguas con presencia de arsénico	24
3.1. Arsénico	24
3.2. Química del arsénico en el agua	25
3.3. Remoción de arsénico	25
3.3.1. Adsorción y coprecipitación	26
3.3.2. Intercambio iónico	27
3.3.3. Virutas de hierro	27
3.3.4. Remoción de arsénico asistida por luz solar (RAOS).....	28
B) Remoción turbiedad	29
1. Turbiedad	29
2. Sedimentación.....	31
3. Coagulación, mezcla y floculación	32
4. Filtración	32

5. Métodos de Remoción	34
5.1. Filtro de arena	34
5.2. Filtro con velas filtrantes de cerámica	34
5.3. Filtro con velas filtrantes de cerámica y prefiltro de arena	35
5.4. Micro y nanofiltración	36
5.5. Filtro de arena y grava	38
5.6. Filtro de grava	40
C) Métodos alternativos de desinfección	43
1. Procesos térmicos de desinfección	44
1.1. Desinfección solar del agua (SODIS)	44
1.2. Reflectores solares	45
1.3. Ebullición	49
2. Desinfección química.....	50
2.1. Dosificador de hipoclorito de sodio	50
2.2. Electrolisis “in situ” (producción de hipoclorito de sodio)	51
3. Procesos fotoquímicos de desinfección	53
3.1. Radiación ultravioleta (UV)	54
3.1.1. Propiedades de la radiación ultravioleta	54
3.1.2. Mecanismos de la desinfección por radiación ultravioleta ..	56
3.1.3. Lámparas UV	57
III. Referencias bibliográficas	58

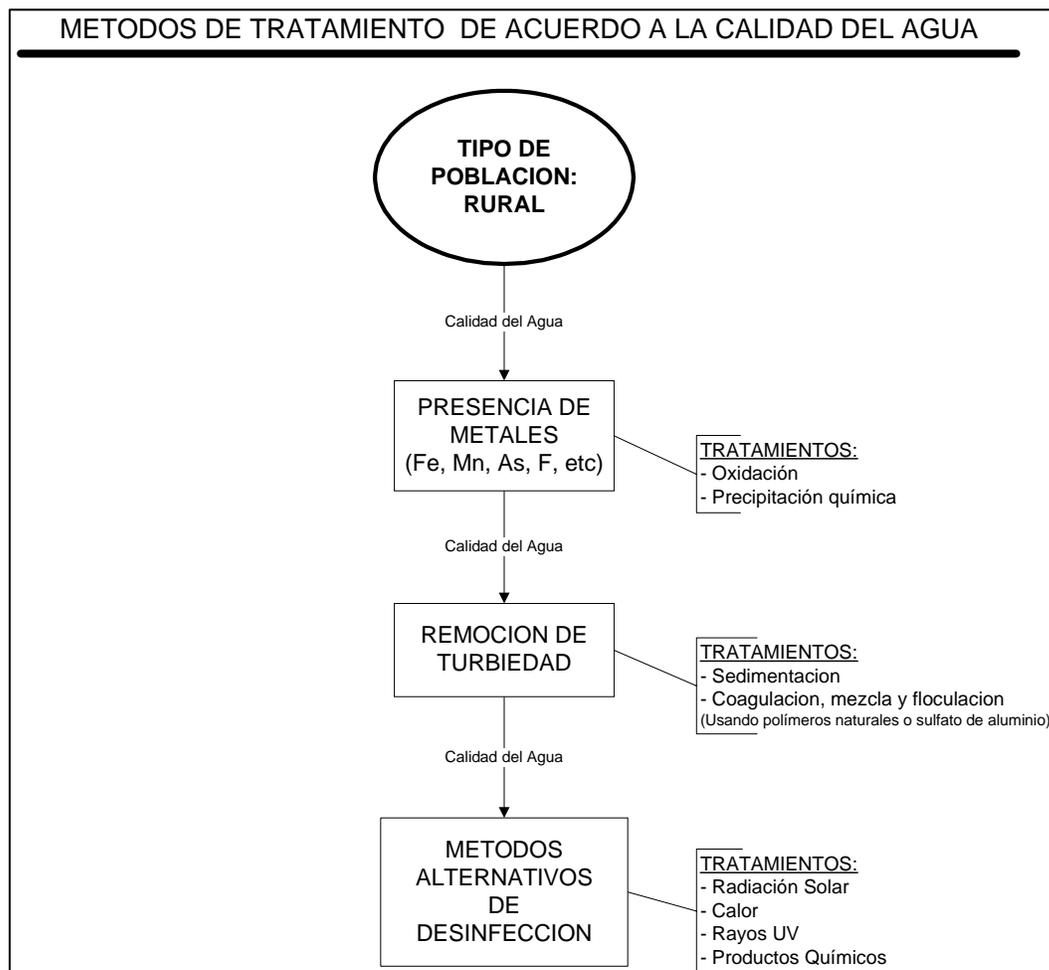
Guía para el mejoramiento de la calidad del agua a nivel casero

I. Introducción

En este documento se presentan algunas opciones tecnológicas para el tratamiento del agua de uso y consumo humano y desinfección en función de la calidad del agua. Se inicia con una descripción de las aguas superficiales y subterráneas como fuentes de abastecimiento, sus problemas de calidad y tratamientos necesarios. Especial atención se da a la desinfección porque en zonas rurales es, en muchos casos, el único tratamiento que recibe el agua de consumo y puede evitar muchas enfermedades infecciosas de carácter agudo que afectan a la población.

Además presentan opciones de tratamiento que se pueden utilizar para mejorar la calidad de agua, de acuerdo a las características que presente esta, como es el caso de la presencia de contaminantes inorgánicos en el agua –metales pesados- y que presentan cierta dificultad en su remoción.

Los métodos propuestos en esta guía, se utilizarán a nivel domiciliario o para pequeñas comunidades, en donde los volúmenes a tratar son pequeños, y no son aplicables a sistemas de abastecimiento más complejos en donde los volúmenes son mayores y los sistemas de tratamiento son más complejos.



1. Consideraciones generales

a) Aguas subterráneas

La mayor parte del agua subterránea se origina del agua de lluvia infiltrada hasta los acuíferos después de fluir a través del subsuelo. Durante la infiltración, el agua puede cargar muchas impurezas; tales como, partículas orgánicas e inorgánicas, detritus de plantas y animales, microorganismos, pesticidas, fertilizantes, etc. Sin embargo, durante su recorrido por el subsuelo mejora significativamente su calidad: las partículas suspendidas y microorganismos se retienen por filtración natural y las sustancias orgánicas se degradan por oxidación. Por otro lado, las sales disueltas, causantes de problemas como dureza y salinidad, no se remueven e incluso, se pueden incrementar considerablemente por la disolución de minerales del subsuelo. Otras sustancias o elementos frecuentemente presentes en las aguas subterráneas son: sulfatos, nitratos, fierro y manganeso, arsénico y flúor.

En muchos casos el agua es de buena calidad y puede usarse y beber directamente sin tratamiento, aunque siempre es preferible la desinfección como barrera de seguridad para prevenir contaminación durante el manejo del agua. Las aguas de pozos pueden contener contaminación microbiológica proveniente de letrinas cercanas, tanques sépticos, pastoreo de ganado o contaminación de sustancias orgánicas sintéticas de productos agroquímicos.

b) Aguas superficiales

Las fuentes de agua superficiales son los ríos, arroyos, lagos y presas. Su origen puede ser el agua subterránea que aflora a la superficie a través de manantiales o el agua de lluvia que fluye sobre la superficie del terreno hacia los cuerpos receptores. Si el agua superficial tiene su origen en el subsuelo, ésta contendrá sólidos disueltos; el agua que escurre por la superficie contribuye a la contaminación de los ríos o lagos principalmente con turbiedad y materia orgánica (como sustancias húmicas que dan color al agua), así como con microorganismos patógenos.

Los ríos y arroyos se caracterizan por tener rápidos cambios de calidad. Durante la época de lluvias se presentan incrementos en la turbiedad y otras sustancias orgánicas e inorgánicas debido al lavado y arrastre de los suelos. En lagos y embalses, el cambio estacional en la calidad del agua es gradual y menos drástico que en los ríos. En los meses de verano el agua se estratifica creando condiciones anóxicas y reductivas en el fondo del embalse que ocasiona la solubilización del fierro y el manganeso, en caso de estar presentes en los sedimentos, creando problemas de color y sabor. Las capas superiores son susceptibles de presentar un alto crecimiento de algas cuando las condiciones de nutrientes y temperatura son favorables (eutroficación).

c) Definiciones

✓ **Calidad del agua**

El término calidad del agua es relativo y sólo tiene importancia universal si está relacionado con el uso del recurso. Esto quiere decir que una fuente de agua suficientemente limpia que permita la vida de los peces puede no ser apta para la natación y un agua útil para el consumo humano puede resultar inadecuada para la industria.

Para decidir si un agua califica para un propósito particular, su calidad debe especificarse en función del uso que se le va a dar. Bajo estas consideraciones, se dice que un agua está contaminada cuando sufre cambios que afectan su uso real o potencial.

Para la presente guía, se considera calidad del agua para consumo humano, lo que significa que podemos tomar como referencia los límites de concentración establecidos por las normas internacionales de calidad de agua para consumo humano.

✓ **Calidad bacteriológica del agua**

En localidades donde el suministro de agua no es continuo o se extraen directamente desde las fuentes (superficial o subterránea), los pobladores lo almacenan -en el nivel domiciliario- en recipientes de cualquier tipo con el fin de atender sus necesidades básicas de bebida, alimentación, aseo y otros. El criterio principal de selección del recipiente es su comodidad para la extracción y el acarreo del agua, antes que la conservación de su calidad bacteriológica.

Diversos estudios demuestran que la mayor parte de las veces, la calidad bacteriológica del agua en la fuente no es apta para bebida. Además el constante manipuleo intradomiciliario realizado para su extracción desde los recipientes de almacenamiento, conlleva a la recontaminación y al consiguiente deterioro de su calidad bacteriológica, aumentando de esta manera la probabilidad de que el agua se convierta en la causa del brote de algún tipo de enfermedad gastrointestinal, principalmente entre la población no atendida con servicios adecuados de disposición de excretas.

Ante esta situación tan común en las áreas deprimidas, el consumo de agua de buena calidad bacteriológica, constituye una de las intervenciones más importantes para interrumpir la vía de transmisión de enfermedades gastrointestinales hacia el hombre.

Aunque es evidente que la instalación de sistemas públicos de abastecimiento de agua que funcionen ininterrumpidamente y suministren agua de buena calidad bacteriológica es la alternativa más eficaz para el control de las enfermedades

gastrointestinales, no es realista esperar que las poblaciones que hoy no cuentan con esos servicios, puedan tenerlos en un futuro inmediato.

Otros importantes factores de riesgo, dentro de la multicausalidad de las enfermedades gastrointestinales, son los alimentos que se consumen crudos y la falta de aplicación de adecuadas prácticas de higiene.

Por las razones expuestas, los sistemas de mejoramiento de la calidad del agua en los domicilios, constituyen una alternativa para atender a las poblaciones que no cuentan con un sistema público de abastecimiento de agua. El objetivo es proveer a la población de agua de buena calidad para beber, cocinar, lavar la vajilla y para la higiene bucal, así como para desinfectar los alimentos que se consumen crudos, y de esta manera, contribuir al control de las enfermedades de origen hídrico.

✓ **Calidad química del agua: “El disolvente universal”**

El agua es el constituyente más importante del organismo humano y del mundo en el que vivimos. Tiene una gran influencia en los procesos bioquímicos que ocurren en la naturaleza. Esta influencia no sólo se debe a sus propiedades fisicoquímicas como molécula bipolar sino también a los constituyentes orgánicos e inorgánicos que se encuentran en ella.

Se considera que el agua es un solvente universal, debido a que es capaz de disolver o dispersar la mayoría de sustancias con las que tiene contacto, sean estas sólidas, líquidas o gaseosas, y de formar con ellas iones, complejos solubles e insolubles, coloides o simplemente partículas dispersas de diferente tamaño y peso. La presencia de sustancias químicas disueltas e insolubles en el agua —que pueden ser de origen natural o antropogénico— define su composición física y química.

Por otro lado, la contaminación de los recursos hídricos superficiales es un problema cada vez más grave, debido a que estos se usan como destino final de residuos domésticos e industriales, sobre todo en las áreas urbanas e incluso en numerosas ciudades importantes del continente. Estas descargas son las principales responsables de la alteración de la calidad de las aguas naturales, que en algunos casos llegan a estar tan contaminadas que su potabilización resulta muy difícil y costosa.

Debido a la amplia gama de contaminantes, a los diferentes niveles de contaminación, así como a la cinética química de las sustancias, elementos, materia orgánica y microorganismos que se incorporan en el cuerpo de agua, es indispensable conocer las características físicas, químicas y biológicas del agua antes de seleccionarla como fuente de agua cruda.

Desde el punto de vista de la salud humana, el agua ayuda a eliminar las sustancias resultantes de los procesos bioquímicos que se desarrollan en el organismo humano, a través de los órganos excretores, en especial la orina y el sudor. Sin embargo, por esta misma propiedad, puede transportar una serie de tóxicos al organismo que pueden afectar a diferentes órganos, de manera reversible irreversible.

2. El agua potable

Se conoce con este nombre al agua que ha sido tratada con el objetivo de hacerla apta para el consumo humano, teniendo en cuenta todos sus usos domésticos.

a) Aspectos fisicoquímicos

Algunas especies biológicas y fisicoquímicas pueden afectar la aceptabilidad del agua para consumo humano. Por ejemplo:

- Su apariencia estética: turbiedad, olor, color y sabor, espuma.
- Su composición química: acidez, alcalinidad, aceites y grasas, compuestos orgánicos e inorgánicos en general.

Es necesario, asimismo, considerar las transformaciones químicas y bioquímicas a que están expuestos los contaminantes del ambiente acuático.

Las alteraciones químicas pueden afectar su disponibilidad biológica o tóxica (aumentarla o disminuirla). Poco se sabe acerca de estos procesos químicos, físicos y biológicos y sus mecanismos, a pesar de que son indispensables para comprender los efectos en la salud del consumidor.

Por citar un ejemplo, aún no se entiende bien la relación que existe entre la dureza del agua y las trazas metálicas y los efectos en el organismo del consumidor, pero se sabe que estos factores pueden influir en la salud y tal vez estar relacionados con algunas enfermedades de la población en diferentes áreas geográficas.

b) Criterios de calidad del agua para consumo humano: las Guías de Calidad para Aguas de Consumo Humano de la OMS

Los programas de control y vigilancia del agua potable requieren normas adecuadas que regulen la calidad del agua de consumo humano, que permitan seleccionar fuentes adecuadas de agua cruda y los procesos de tratamiento y distribución.

Las Guías de Calidad para Aguas de Consumo Humano de la OMS (cuadro 1) constituyen una herramienta válida referida a la calidad fisicoquímica del agua destinada al consumo del hombre. A partir de ellas cada país puede establecer sus propias normas y tener en cuenta los siguientes criterios básicos:

- Los valores establecidos para cada parámetro deben asegurar la aceptabilidad estética del agua y no representar riesgos para la salud del consumidor.

- La calidad del agua debe ser adecuada para el consumo humano y tomar en cuenta todos los usos domésticos.
- Los valores establecidos sirven como señal para que cuando se supere este valor:
 - Se investigue la causa
 - Se consulte con las autoridades responsables de la salud pública.

Las autoridades deben asegurar que la calidad del agua sea aceptable para ser consumida durante toda la vida. Las metas señaladas están dirigidas a salvaguardar la salud del consumidor. Algunas exposiciones a contaminantes por periodos cortos pueden ser toleradas, siempre que el nivel de toxicidad se controle adecuadamente.

El no cumplimiento de las metas señaladas por corto tiempo no significa necesariamente que el agua deba ser descartada definitivamente para el consumo.

La elaboración de las normas nacionales de calidad del agua potable debe tomar en cuenta consideraciones locales como la geografía, la situación socioeconómica, la dieta y las actividades industriales.

Aspectos fisicoquímicos. Las normas de calidad fisicoquímica del agua potable son muy estrictas respecto a sus regulaciones. Solo aquellas relacionadas con la preservación de la vida acuática son más exigentes.

En este guía hemos presentado lo dispuesto por las regulaciones internas de la EPA (4) en Estados Unidos, las Guías de Calidad para Aguas de Consumo Humano de la OMS (3) y las Guías de Calidad de Agua para Bebida del Canadá de 1978 (2) (cuadro 1).

Cuadro 1. Criterios de calidad para el agua potable.

Parámetros		Regulaciones Internas Primarias	Guías de Calidad para el Agua de Bebida del Canadá-1978 (2)	Guidelines for Drinking-Water Quality OMS, 1988 (3)
Unidades		Nivel máximo del contaminante	Concentración máxima aceptable	Valor guía
Físicos				
Color	TCU	—	15	15
Sabor y olor		Aceptable	—	Aceptable
Turbiedad	UNT	5 ^a	5	5 ^a
Inorgánicos				
Amonio	mg/L	—	—	0,2
Amonio	mg/L	—	—	1,5
Antimonio	mg/L	0,006	—	0,005 ^b
Arsénico	mg/L	0,05	0,05	0,01 ^a
Bario	mg/L	2,0	1,0	0,7
Boro	mg/L	—	5,0	0,3
Cadmio	mg/L	0,005	0,005	0,005
Cianuro	mg/L	0,2	0,2	0,07
Cinc	mg/L	—	5,0	3
Cloro	mg/L	—	—	5 ^a
Cloruro	mg/L	—	250	250
Cobre	mg/L	1,3 ^{**}	1,0	2 ^a
Cromo (total)	mg/L	0,1	0,05	0,05 ^b
Fluoruro	mg/L	4	1,5	1,5
Hierro	mg/L	—	0,3	0,3
Manganeso	mg/L	—	0,05	0,5 ^b
Mercurio	mg/L	0,002	0,001	0,001
Nitrato (como N)	mg/L	10	10 ^f	50 ^j
Nitrato (como N)	mg/L	1	1,0 ^f	3
pH	—	—	6,5 – 8,5	—
Plata	mg/L	—	0,05	*
Plomo	mg/L	0,015 ^{**}	0,05	0,01
Selenio	mg/L	0,05	0,01	0,01
Sulfato	mg/L	—	500	250
Sulfuros (H ₂ S)	mg/L	—	0,05	0,05 ^g
Sólidos disueltos	mg/L	—	500	1.000

TCU: Unidades de Color Verdadero.

UNT: Unidades Nefelométricas de Turbiedad.

^(a) Valor guía provisional.

^(b) En las concentraciones normalmente encontradas, no se ha detectado daño en la salud.

* La Regla de Tratamiento de Agua de Superficie requiere que los sistemas que usan agua de superficie o subterránea bajo influencia directa de agua de superficie: (1) desinfecten el agua y (2) filtren el agua o realicen el mismo nivel de tratamiento que aquellos que filtran el agua. El tratamiento debe reducir los niveles de *Giardia lamblia* (parásito) en 99,9% y los virus en 99,99%. La *Legionella* (bacteria) no tiene límites, pero la EPA considera que si se inactivan la *Giardia* y los virus, la *Legionella* también estará controlada. En ningún momento la turbiedad (enturbiamiento del agua) puede superar las 5 UNT (los sistemas filtrantes deben asegurar que la turbiedad no supere una UNT [0,5 UNT para filtración convencional o directa] en al menos 95% de las muestras diarias de cualquier mes); HPC: no más de 500 colonias por mililitro.

^(c) Turbiedad promedio para una efectiva desinfección: = 1 UNT. Muestra simple: = 5 UNT.

^(d) Por ser consideradas sustancias cancerígenas.

^(e) Concentraciones establecidas porque a concentraciones mayores, se pueden ver afectados el sabor, el olor y la apariencia del agua.

^(f) Cuando nitrato y nitrato están presentes, la suma de las dos concentraciones no debe exceder 10 mg/L.

^(g) La suma de la razón entre la concentración de cada uno y su respectivo valor guía no debe exceder de 1.

^(h) Se aplica cuando más de un plaguicida considerado en las guías de calidad están presentes en el agua.

⁽ⁱ⁾ Relacionado con el olor y el sabor del agua.

^(j) El plomo y el cobre se regulan mediante una técnica de tratamiento que exige la implementación de sistemas que controlen el poder corrosivo del agua. El nivel de acción sirve como un aviso para que los sistemas públicos de agua tomen medidas adicionales de tratamiento si los niveles de las muestras de agua superan en más de 10% los valores permitidos.

II. Mejoramiento de la calidad del agua a nivel casero

La presente guía, contiene diversos métodos que se pueden utilizar a nivel casero para mejorar la calidad del agua, poniendo especial atención en la desinfección porque en zonas rurales es, en muchos casos, el único tratamiento que recibe el agua de consumo, además de los problemas que ocasionan los contaminantes inorgánicos (metales pesados), debido a que es el grupo que más dificultades puede presentar, y en donde los métodos convencionales de tratamiento no son efectivos en todos los casos o requieren de una gran capacidad técnica y económica. La forma química en la que estos se encuentren y el pH del agua son factores críticos que si no se toman en cuenta y no se controlan adecuadamente durante el proceso de tratamiento, pueden hacer fracasar el método.

Cuando se identifiquen contaminantes inorgánicos muy tóxicos en concentraciones altas o estos sean de difícil remoción, como factor de seguridad, debería considerarse la búsqueda de otras fuentes alternas que no los contengan.

En la selección de los procesos de tratamiento, para atender las exigencias de carácter microbiológico y fisicoquímico se deben efectuar estudios cuidadosos y detallados de la fuente y la cuenca hidrográfica, que incluya la caracterización del agua e identificación de fuentes potenciales de contaminación. Las tecnologías de tratamiento para localidades rurales deben tener requerimientos técnicos (mano de obra, instalaciones, insumos energéticos, reactivos químicos, operación y mantenimiento) y económicos (costos de inversión, operación y mantenimiento) acordes a la capacidad de la comunidad y al nivel de apoyo de instituciones regionales responsables del agua y la salud. Además, se debe involucrar a la comunidad en la planeación, selección, diseño, construcción, administración, operación y mantenimiento de los sistemas de tratamiento para que éstos sean apropiados y sustentables.

Es necesario también evaluar el efecto o daño a la salud humana de los contaminantes para rechazar la fuente de agua, particularmente para sistemas de abastecimiento de comunidades pequeñas donde la elección de otra fuente de abastecimiento y las oportunidades de tratamiento son limitadas. Por ejemplo, agua subterránea con valores de fierro, manganeso o sulfatos mayores a los límites permisibles marcados en la norma de calidad de agua, puede ser utilizada a pesar de sus inconvenientes de carácter organoléptico, porque el daño a la salud no es agudo ni crónico.

Existen otras sustancias que también se han fijado como parámetros de calidad por criterios estéticos y no sanitarios que también debieran removerse del agua, como los sólidos suspendidos y la materia orgánica natural. Otro parámetro contaminante que generalmente no se remueve por su complejidad de tratamiento y porque no tiene efectos directos sobre la salud, es la dureza. Estos contaminantes podrían reducirse a niveles aceptables si la comunidad tiene capacidad técnica y económica para administrar y operar un sistema de tratamiento y además hay aceptación por parte de los usuarios. El parámetro de calidad del agua más importante que se debe vigilar y eliminar es el microbiológico, por su efecto agudo en la salud humana.

A) Presencia de metales en la fuente de agua

La presencia de metales en el agua se debe, a la capacidad que tiene esta de disolver o dispersar la mayoría de sustancias con las que tiene contacto, sean estas sólidas, líquidas o gaseosas, y de formar con ellas iones, complejos solubles e insolubles, coloides o simplemente partículas dispersas de diferente tamaño y peso.

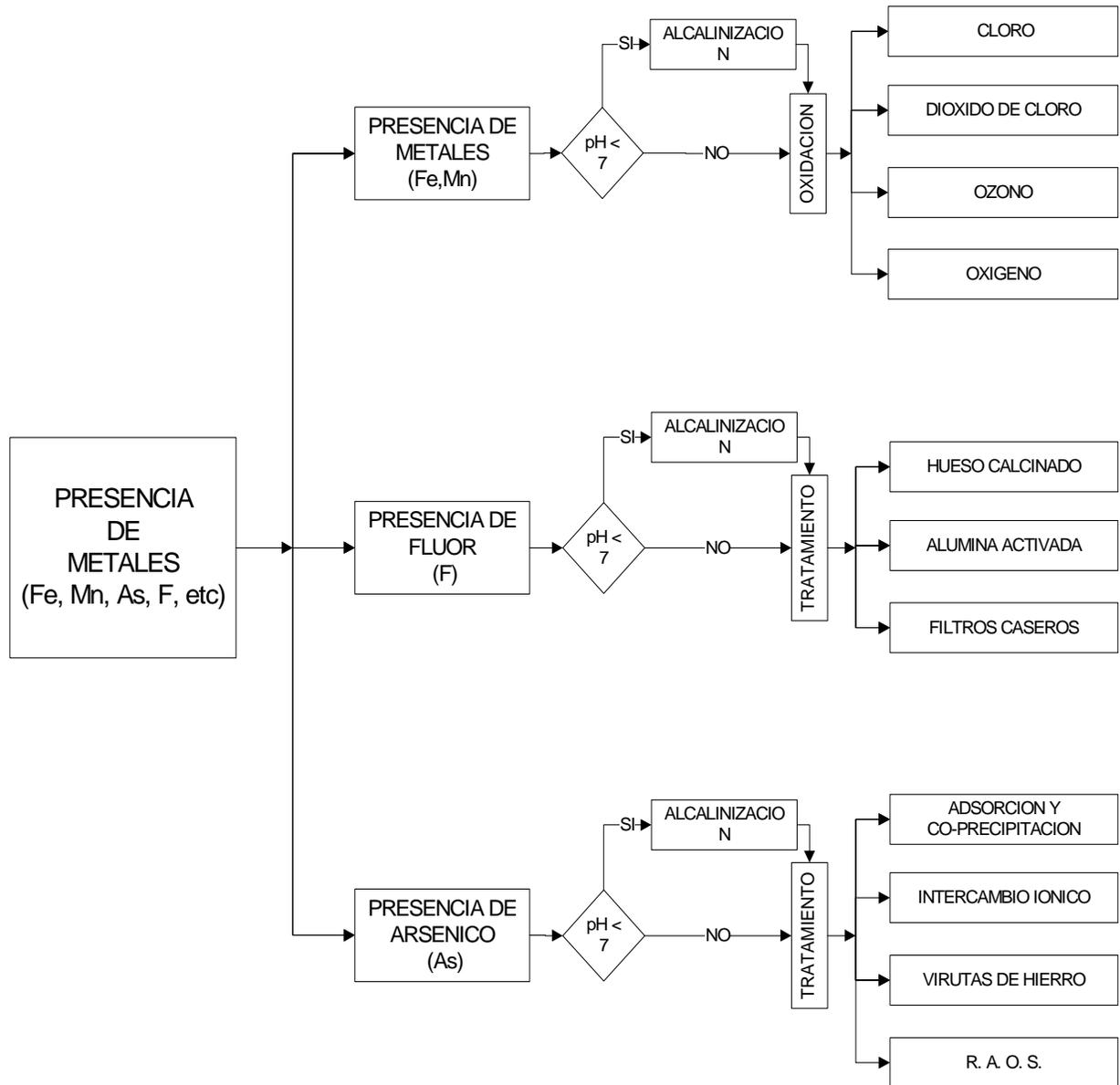
Por otro lado, la contaminación de los recursos hídricos superficiales es un problema cada vez más grave, debido a que estos se usan como destino final de residuos domésticos e industriales, sobre todo en las áreas urbanas e incluso en numerosas ciudades importantes del continente. Estas descargas son las principales responsables de la alteración de la calidad de las aguas naturales, que en algunos casos llegan a estar tan contaminadas que su potabilización resulta muy difícil y costosa.

Entre los contaminantes se tiene el plomo, mercurio, cadmio, cromo y arsénico, que son algunos de los metales pesados que producen las industrias de productos dentales, mineras, fungicidas y de baterías de plomo, así como las plantas de recubrimientos electrolíticos y recicladoras de baterías. Estos metales, al ser desechados a los cuerpos de agua, son capaces de alterar la cadena de vida de varias especies.

Debido a la amplia gama de contaminantes, a los diferentes niveles de contaminación, así como a la cinética química de las sustancias que se incorporan en el cuerpo de agua, es indispensable conocer las características fisicoquímicas y biológicas del agua antes de seleccionarla como fuente de agua cruda.

En este capítulo se van a presentar métodos de remoción que pueden ser aplicados, a nivel casero, en el tratamiento del agua con presencia de metales, de acuerdo a los requerimientos de cada población. Siguiendo el algoritmo de selección que a continuación se presenta.

MÉTODOS DE TRATAMIENTO EN PRESENCIA DE METALES



En los diversos métodos que se verán en la remoción de metales, uno de los requisitos importantes para la realización de los tratamientos es el acondicionamiento del agua a un pH determinado (generalmente $\text{pH} > 7$), es por ello que se tendrá en cuenta el proceso de alcalinización.

✓ **Alcalinización**

- Comenzaremos por definir que es la alcalinidad y pH:

Alcalinidad. Es la capacidad del agua de neutralizar ácidos. Sin embargo, aniones de ácidos débiles (bicarbonatos, carbonatos, hidróxido, sulfuro, bisulfuro, silicato y fosfato) pueden contribuir a la alcalinidad.

La alcalinidad está influenciada por el pH, la composición general del agua, la temperatura y la fuerza iónica.

Por lo general, está presente en las aguas naturales como un equilibrio de carbonatos y bicarbonatos con el ácido carbónico, con tendencia a que prevalezcan los iones de bicarbonato. De ahí que un agua pueda tener baja alcalinidad y un pH relativamente alto o viceversa.

La alcalinidad es importante en el tratamiento del agua porque reacciona con coagulantes hidrolizables (como sales de hierro y aluminio) durante el proceso de coagulación. Además, este parámetro tiene incidencia sobre el carácter corrosivo o incrustante que pueda tener el agua y, cuando alcanza niveles altos, puede tener efectos sobre el sabor.

Durante el tratamiento, las aguas crudas de muy baja alcalinidad pueden requerir la adición de un alcalinizante primario (como el hidróxido de calcio).

La EPA no hace recomendaciones respecto a la alcalinidad en fuentes de agua, ya que esta se liga a factores como el pH y la dureza, pero concluye que una fuente no debe mostrar cambios bruscos o repentinos en el contenido de la alcalinidad, pues esto podría indicar un cambio en la calidad del agua.

pH. El pH influye en algunos fenómenos que ocurren en el agua, como la corrosión y las incrustaciones en las redes de distribución. Aunque podría decirse que no tiene efectos directos sobre la salud, sí puede influir en los procesos de tratamiento del agua, como la coagulación y la desinfección. Por lo general, las aguas naturales (no contaminadas) exhiben un pH en el rango de 5 a 9. Se considera que el pH de las aguas tanto crudas como tratadas debería estar entre 5,0 y 9,0. Por lo general, este rango permite controlar sus efectos en el comportamiento de otros constituyentes del agua. Las guías canadienses han establecido el rango de pH 6,5 a 8,5 para el agua potable.

Con la ayuda de los conceptos anteriormente descritos, se puede decir que, la alcalinización es un proceso en la cual se adiciona un álcali (por lo general, cal - CaO), cuando se tratan aguas ácidas o se quiere modificar el pH y así optimizar los procesos de coagulación.

✓ **Alcalinizantes**

La cal virgen o viva, la cal hidratada o extinta y la cal dolomítica son denominaciones comerciales del óxido de calcio (CaO), del hidróxido de calcio [Ca(OH)₂] y de mezclas derivadas tales como el óxido de magnesio (MgO) y el hidróxido de magnesio [Mg(OH)₂] en proporciones que pueden alcanzar el 50%. Los efectos de la neutralización del CaO o MgO, Ca(OH) o Mg(OH)₂ son teóricamente equivalentes.

En la práctica, en la corrección final del pH, la parte de magnesio de la mezcla tiene menor solubilidad que la del calcio. Inicialmente, se presenta en el agua como turbidez. La parte de calcio se solubiliza y actúa hasta alcanzar el pH deseado. La turbidez de magnesio (de solubilidad retardada), al solubilizarse en la tubería, vuelve a producir el pH.

Otras remociones obtenidas por control del pH con la adición de cal:

Bario

Por otro lado, un control adecuado del pH en la planta de ablandamiento del agua mediante cal puede lograr una remoción de 90% del bario.

Boro

Estudios realizados en plantas piloto han demostrado gran eficiencia de remoción de boro en los procesos de ablandamiento cal-soda a pH 8,5–11,3 (98%) y, en menor grado, en la coagulación con sulfato férrico.

Cadmio

Se ha encontrado que los procesos de coagulación remueven el cadmio, pero una variable importante es el pH. Al usar sales de aluminio y regular el pH, es posible la remoción de 90% de cadmio en aguas turbias.

El sulfato de hierro puede remover 90% de cadmio a pH 7,5.

El proceso de ablandamiento cal-soda puede tener una efectividad cercana a 100%, debido a que se lleva a cabo a pH alto.

1. Tratamiento de aguas con presencia de hierro y manganeso

Las fuentes de abastecimiento de agua subterránea son las que se más ven afectadas por la presencia de hierro (Fe) y manganeso (Mn), los cuales se encuentran en forma soluble, que al oxidarse, ya sea al momento de la cloración o con el oxígeno del aire, se precipitan generando un color oscuro que provoca el rechazo de los consumidores, manchan la ropa, obstruyen tuberías, accesorios y bombas.

Hasta el momento no se conocen efectos nocivos para la salud de estos elementos, sin embargo, las concentraciones elevadas de manganeso pueden acelerar el crecimiento biológico en los sistemas de distribución y contribuir a los problemas de sabor y olor en el agua, así mismo aumentan la demanda de cloro u otros oxidantes aplicados en la desinfección.

El hierro tiene más demanda que el manganeso, aunque, por lo general, se utilizan simultáneamente. Las aguas almacenadas en represas en cuyo fondo quedan sumergidas formaciones mangano-ferruginosas, tienden a acumular hierro y manganeso debido a que la descomposición de la materia orgánica acumulada en la parte más profunda de la presa resulta en la eliminación del oxígeno y CO_2 , de tal manera que los compuestos de hierro y manganeso existentes en el suelo y en las rocas sumergidas se convierten en compuestos solubles. Las aguas próximas a la superficie de las represas probablemente tienen menos hierro y manganeso.

1.1 Hierro

El hierro es un constituyente normal del organismo humano (forma parte de la hemoglobina). Por lo general, sus sales no son tóxicas en las cantidades comúnmente encontradas en las aguas naturales.

La presencia de hierro puede afectar el sabor del agua, producir manchas indelebles sobre los artefactos sanitarios y la ropa blanca. También puede formar depósitos en las redes de distribución y causar obstrucciones, así como alteraciones en la turbiedad y el color del agua.

Tiene gran influencia en el ciclo de los fosfatos, lo que hace que su importancia sea muy grande desde el punto de vista biológico. En la naturaleza se presenta en dos formas: asimilable y no asimilable.

En las aguas superficiales, el hierro puede estar también en forma de complejos organoférricos y, en casos raros, como sulfuros. Es frecuente que se presente en forma coloidal en cantidades apreciables.

Las sales solubles de hierro son, por lo general, ferrosas (Fe II) y la especie más frecuente es el bicarbonato ferroso: $\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$.

Este metal en solución contribuye con el desarrollo de microorganismos que pueden formar depósitos molestos de óxido férrico en la red de distribución.

Por consideraciones de sabor y debido a que los tratamientos convencionales pueden eliminar el hierro en estado férrico pero no el hierro soluble Fe (II), las guías de calidad de la OMS y del Canadá recomiendan que en las aguas destinadas al consumo humano no se sobrepase 0,3 mg/L de hierro.

1.2 Manganeseo

El manganeso es un elemento esencial para la vida animal; funciona como un activador enzimático. Sin embargo, grandes dosis de manganeso en el organismo pueden causar daños en el sistema nervioso central.

Su presencia no es común en el agua, pero cuando se presenta, por lo general está asociado al hierro. Comúnmente se encuentra en el agua bajo su estado reducido, Mn (II), y su exposición al aire y al oxígeno disuelto lo transforma en óxidos hidratados menos solubles.

En concentraciones mayores a 0,15 mg/L, las sales disueltas de manganeso pueden impartir un sabor desagradable al agua.

La presencia de manganeso en el agua provoca el desarrollo de ciertas bacterias que forman depósitos insolubles de estas sales, debido a que se convierte, por oxidación, de manganeso en solución al estado mangánico en el precipitado. Esta acción es similar en el hierro.

Las Guías de Calidad para Aguas de Consumo Humano de la OMS establecen como valor provisional 0,5 mg/L, pero las Guías de Calidad para Agua de Bebida del Canadá recomiendan una concentración diez veces menor: 0,05 mg/L, por consideraciones principalmente relacionadas con el sabor y el olor del agua.

1.3 Remoción de hierro y manganeso

La remoción del hierro de las aguas crudas superficiales es relativamente fácil con los procesos comunes de remoción de la turbiedad, mediante los cuales su concentración puede bajar de 10 mg/L a 0,3 mg/L, que es la concentración recomendada para el agua de consumo. Sin embargo, es posible que haya problemas si el hierro está presente en complejos orgánicos inestables. Por lo general, en el agua es más difícil de controlar el manganeso que el hierro.

Su remoción se realiza formando sales insolubles, para lo cual, en muchos casos, es necesario el uso de oxidantes y un pH alto. Es necesario elevar el pH de 8,5 a 10,0, pero la precipitación es mejor cuando la aeración está acompañada por un contacto de dióxido de manganeso o un lecho de mineral de pirolusita.

Cuando se remueve el hierro y el manganeso, estos se pueden acumular en los sistemas de distribución, transmitir sabor y olor al agua, darle color, interferir en la determinación del residual de cloro y provocar manchas en la ropa y en los sanitarios.

Entre los procesos de remoción tenemos:

1.3.1 Aireación-Filtración

El proceso de aireación-filtración se recomienda para agua con alta concentración de hierro (mayor de 5 mg/L) con el fin de disminuir los costos en reactivos. El equipo usado en este proceso incluye comúnmente un aireador, un tanque de retención y filtros. El oxígeno de la atmósfera reacciona con las formas solubles de hierro y manganeso (Fe^{+2} y Mn^{+2}) del agua cruda para producir óxidos relativamente insolubles (Fe^{+3} y Mn^{+4}) de estos elementos. La velocidad de reacción depende del pH de la solución, siendo más rápida a valores de pH altos. Ya que el manganeso tiene una velocidad de oxidación muy lenta vía el O_2 (ac) esta técnica no es muy efectiva para la remoción de Mn^{+2} , excepto a valores de pH mayores de 9,5. Para disminuir las concentraciones de manganeso al nivel deseado se requieren frecuentemente un tiempo de reacción y un tratamiento químico adicionales.

Dependiendo de las características del agua cruda puede ser necesario un tiempo de reacción hasta de algunas horas después de la aireación. Si las concentraciones de hierro y manganeso total son altas, algunas veces se usan tanques de sedimentación con dispositivos de colección y remoción de lodos en vez de tanques de retención simples. Las principales desventajas del proceso de aireación-filtración son el costo inicial alto, y el requerimiento de un tiempo de retención y tratamiento químico adicionales si la concentración de Mn soluble del agua a tratar es mayor a 1 mg/L.

✓ Oxígeno

En contacto con el oxígeno disuelto en el agua, las sales ferrosas se convierten en férricas por oxidación y se precipitan en forma de hidróxido férrico. Esta precipitación es inmediata con un pH superior a 7,5. Con un pH mayor de 2,2, el hidróxido férrico es insoluble. El ión ferroso lo es con un pH mayor de 6. De acuerdo con ello, las aguas subterráneas —que, por estar fuera del contacto con el aire, se encuentran en un medio natural fuertemente reductor— podrán tener en solución cantidades notables de hierro ferroso.

✓ Métodos de aeración

La aireación se efectúa mediante caídas de agua en escaleras, cascadas, chorros y también aplicando el gas a la masa de agua mediante aspersion o burbujeo.

Se usa en la remoción de hierro y manganeso, así como también de anhídrido carbónico, ácido sulfhídrico y sustancias volátiles, para controlar la corrosión y olores. En la aeración, el hierro se puede oxidar, pero en la remoción del manganeso, la aeración sola no es suficiente.

Aeradores de cascada: El principio general consiste en esparcir el agua al máximo y dejarla correr sobre obstáculos para producir turbulencia. La estructura más simple es la de escaleras, las cuales esparcen el agua y permiten la caída de un nivel a otro.

1.3.2 Oxidación-Filtración

El proceso de oxidación-filtración consiste normalmente de un sistema de dosificación de productos químicos y filtros. Algunas veces se requiere un tanque de retención y un sistema de ajuste de pH con hidróxido de sodio (NaOH), hidróxido de calcio o cal hidratada $\text{Ca}(\text{OH})_2$ o carbonato de sodio (Na_2CO_3). Este proceso opera a pH mayor o igual a 8,4, pero se tienen deficiencias en el proceso de filtración por la formación de precipitados coloidales que pasan a través del filtro. Como agentes oxidantes pueden usarse:

✓ **Cloro**

El cloro, oxidante poderoso, es, sin duda alguna, el desinfectante más importante que existe, debido a que reúne todas las ventajas requeridas, incluyendo su fácil dosificación y costo conveniente.

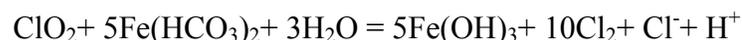
La coagulación convencional mediante el sulfato de aluminio, especialmente cuando se practica la precloración, remueve el fierro y el manganoso.

Se obtienen mejores resultados cuando se utiliza sulfato de hierro II clorado o sal de hierro III con cal como coagulante para la coagulación en valores altos de pH.

✓ **Dióxido de cloro**

La acción oxidante del dióxido de cloro a menudo mejora el gusto, olor y color del agua. El dióxido de cloro reacciona en el agua con compuestos fenólicos, sustancias húmicas, sustancias orgánicas e iones metálicos.

Por ejemplo, el dióxido de cloro oxida el hierro, el cual se precipita fuera del agua como hidróxido de hierro. Luego, el precipitado se remueve fácilmente mediante filtración.



El dióxido de cloro reacciona con sustancias orgánicas, generalmente por oxidación, y forma pocos compuestos orgánicos clorados.

Los compuestos fenólicos presentes en el agua potable se deben principalmente a la contaminación proveniente de fuentes industriales. Estas moléculas, aun cuando están en concentraciones de microgramos por litro, dan un olor y sabor desagradables. El dióxido de cloro reacciona rápidamente con los fenoles. Esta reacción puede variar en diferentes sistemas y ocasionar:

- La formación de quinonas o cloroquinonas.
- La ruptura del anillo aromático y la formación de derivados alifáticos.

El dióxido de cloro oxida al ácido húmico, un precursor de los THM, con lo que minimiza la formación de compuestos halogenados en el tratamiento secundario.

✓ **Ozono**

Por lo general la ozonización suele utilizarse cuando se requiere emplear su propiedad más importante: su elevado potencial oxidante, lo cual permite eliminar los compuestos orgánicos que dan un color, sabor y/u olor desagradable al agua como son la presencia de fierro y manganeso en el agua y al mismo tiempo inactivar a los microorganismos patógenos del agua.

A pesar de sus excelentes propiedades, su uso se ha restringido a ciudades grandes con fuentes de agua altamente contaminadas, y se ha empleado muy poco en comunidades pequeñas y de porte medio. El inconveniente principal para las comunidades pequeñas ha sido el costo inicial y el de operación, así como las dificultades operacionales y de mantenimiento. Sin embargo, en circunstancias, cuando todas las fuentes de agua accesibles están muy contaminadas (biológica y/o químicamente), puede ser el método más recomendable para la oxidación de las sustancias orgánicas y desinfección primaria, siempre que cuente con la adición de un sistema de cloración secundario para mantener un efecto residual durante su distribución.

Además como un proceso alternativo de remoción tenemos el ablandamiento, que es un proceso que se aplica para eliminar la dureza del agua, donde la remoción del Fe y Mn es un efecto secundario. Dicho proceso consiste en elevar el pH del agua para precipitar al calcio y magnesio, originando que se oxide el Fe y Mn y coprecipiten con los carbonatos (a valores de pH mayores de 11). Este método no es muy eficiente, ya que se forman precipitados de manganeso de tamaño coloidal que pasan a través de los filtros cuando no se agregan coagulantes.

2. Tratamiento de aguas con presencia de flúor

El flúor es un componente normal en las muestras de agua naturales. Su concentración, varía significativamente dependiendo de la fuente de agua. Aunque las fuentes geológicas y artificiales contribuyen a la presencia de flúor en el agua, la contribución principal viene de recursos geológicos. Excepto en casos aislados, las aguas superficiales raramente tienen niveles de flúor mayor de 0,3 mg/l. Ejemplos comunes son corrientes de agua que fluyen sobre granito rico en minerales y los ríos que reciben el flúor de aguas residuales industriales sin tratar.

2.1. Flúor

Elemento esencial para la nutrición del hombre. Su presencia en el agua de consumo a concentraciones adecuadas combate la formación de caries dental, principalmente en los niños (0,8 a 1,2 mg/L).

Sin embargo, si la concentración de fluoruro en el agua es alta, podría generar manchas en los dientes (“fluorosis dental”) y dañar la estructura ósea. Algunos países como el Canadá y Estados Unidos han implementado programas de fluorización del agua de consumo como una medida para prevenir la caries dental infantil.

Las principales fuentes de concentraciones contaminantes de flúor en el agua son los efluentes de fábricas de acero y metales o de fábricas de plásticos y fertilizantes.

Los procesos convencionales de coagulación con aluminio no son efectivos para la remoción de fluoruros. Sorg reportó que para reducir la concentración de fluoruros en el agua de 3,6 a 1 mg/L se requerirían 350 mg/L de aluminio.

Debido a que la concentración de fluoruros en el agua está en función de la temperatura del agua, la EPA recomienda un rango máximo de 4 mg/L en aguas para consumo humano. Las guías de calidad de agua para consumo humano, tanto del Canadá como de la OMS, indican como valor guía 1,5 mg/L.

2.2. Remoción de flúor

Si la concentración del flúor en el abastecimiento de agua de una comunidad está perceptiblemente y constantemente más allá del nivel permitido, es esencial considerar medidas remediadoras para combatirlo. Existen dos opciones disponibles: el tratamiento central del agua en la fuente y el tratamiento del agua a nivel casero.

Entre los procesos de remoción tenemos:

2.2.1. Hueso calcinado

Este método consiste en huesos de animal molidos (ejemplo: el fémur de la res) que se han carbonizado para quitarle toda la materia orgánica. Los mayores componentes del hueso calcinado son fosfato de calcio, carbonato de calcio y carbón activado. El mecanismo de remoción de flúor implica reemplazar el carbonato de los huesos calcinados por el ión flúor. El método de preparación del hueso es crucial para que tenga una buena capacidad de captación de fluoruro y la calidad del agua tratada.

La pobre calidad de los huesos puede impartir un mal olor y un mal sabor al agua. Al agotarse el hueso calcinado se utiliza soda cáustica para su regeneración. La presencia de arsénico interfiere en la remoción del flúor.

Para la preparación de los huesos se debe tomar en cuenta:

✓ Transporte, limpieza y preparación del hueso

Este procedimiento de limpieza consistió en remover de los huesos los restos de tejidos, cortan con una segueta en trozos pequeños, eliminar las puntas o rotulas que por lo general son los que almacenan mas grasa, quitar la medula central y lavar con agua.

Calcinar el hueso a altas temperaturas en la mufla (400 °C durante una hora).

Molido del hueso una vez carbonizado y realización de análisis granulométrico para ver si la granulometría se ajusta al perfil necesario para que sea usado como un medio filtrante, hacer las correcciones granulométricas de ser necesario.

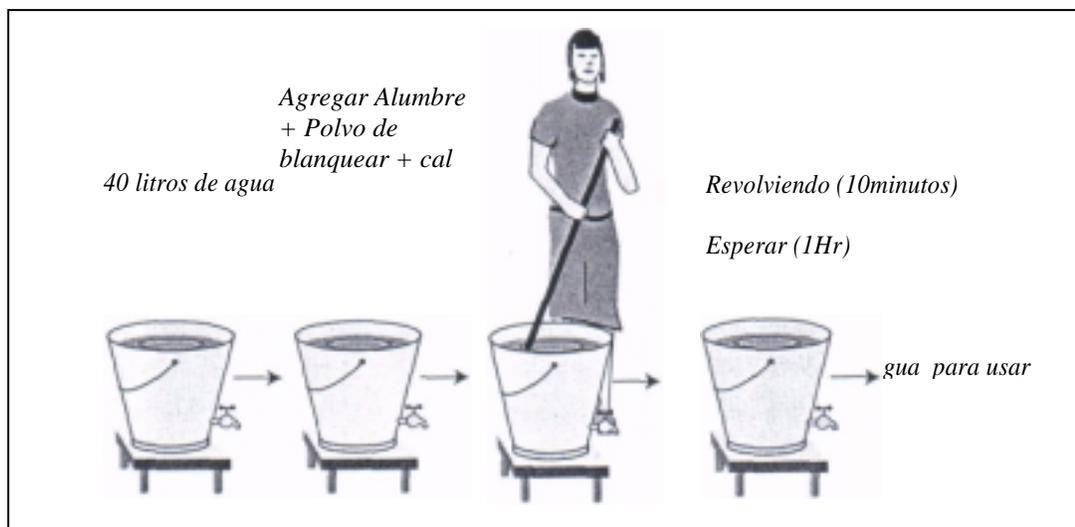
Evaluar propiedades físicas del carbón de hueso (densidad, peso volumétrico seco y húmedo, porosidad, relación de vacíos, coeficiente de uniformidad, esfericidad, tamaño efectivo, etc.).

Para el hueso desgrasado se emplea sosa cáustica para la remoción de grasa y tejidos.

2.2.2. Alúmina activada

Este método implica la adición de productos químicos solubles al agua, el producto químico más utilizado es Alúmina activada o calcinada, químicamente es el Oxido de Aluminio Al_2O_3 . La capacidad de captación de flúor depende de la calidad específica de alúmina activada, el tamaño de las partículas y la química del agua (pH, alcalinidad y concentración de flúor). Los mecanismo de remoción de flúor es muy probable que ocurra en el intercambio de reacción en la superficie de la alúmina activada, al agotarse la alúmina activada se utiliza soda cáustica para su regeneración.

La técnica de nalgonda se ha utilizado con éxito a nivel individual, así como a nivel de comunidad en la India y otros países en vías de desarrollo como China y Tanzania. Las unidades domésticas de remoción de flúor se diseñan para el tratamiento de 40 litros de agua se pueden utilizar para las comunidades pequeñas.

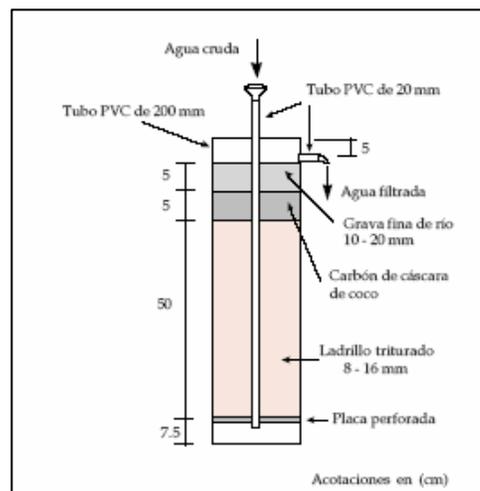


2.2.3. Filtros caseros de Intercambio iónico de bajo costo

En el distrito de Anuradhapura, Sri Lanka, en el año de 1994 se llevó a cabo un estudio de campo para remoción de flúor con filtros caseros de intercambio iónico - adsorción de bajo costo. El dispositivo consta de un cilindro de 20 cm de diámetro y 75 cm de alto.

El medio filtrante es arcilla rica en hierro cocida a baja temperatura con un tamaño de grano entre 16 y 8 mm (ladrillo o tabique molido) y un espesor de lecho de 50 cm. Ésta contiene además silicatos, aluminatos y hematita. Sobre la arcilla se coloca una capa de 5 cm de espesor de carbón vegetal, como el de cáscara de coco, para remoción de olores y encima de ésta una tercera capa de 5 cm de gravilla de río con tamaño de grano entre 1 a 2 cm con el fin de mantener el lecho en su lugar. El filtro tiene una capacidad de 16 litros y trabaja con flujo ascendente intermitente y puede reducir los fluoruros en las aguas subterráneas de 4 mg/l hasta menos de 1 mg/l. Cuando la arcilla se sumerge en agua por varias horas, sus minerales se convierten a oxihidróxidos de hierro, aluminio y sílice, que tienen la capacidad de intercambiar sus hidroxilos por los fluoruros contenidos en el agua. La principal característica de este filtro es que debe ser operado por lotes para dar a cada volumen de agua cruda el tiempo de contacto o retención necesario para la adsorción de los fluoruros.

Durante las pruebas en campo, los filtros se operaron de la siguiente manera: recolección de 10 litros de agua filtrada por la mañana después de un tiempo de retención de 16 horas y 5 litros por la tarde con un tiempo de retención de 8 horas. Los filtros operaron eficientemente los primeros días y en el transcurso del tiempo fueron bajando su eficiencia. La vida útil del medio filtrante es de dos a tres meses dependiendo del nivel de fluoruros en el agua cruda. Después de agotarse el material, los usuarios pueden remplazarlo por uno nuevo de manera sencilla. Las ventajas de esta unidad son el bajo costo de fabricación, disponibilidad de medio filtrante altamente poroso en la localidad y fácil operación y mantenimiento por los usuarios.



Filtro de arcilla cocida para eliminación de flúor.

3. Tratamiento de aguas con presencia de arsénico

El arsénico es el vigésimo elemento más abundante en la corteza terrestre. Normalmente se encuentra disuelto en el agua superficial y el agua subterránea en orden de magnitud de microgramos por el litro ($\mu\text{g/L}$). Es un elemento altamente tóxico, pero cuando está disuelto en agua es descolorido, inodoro e insípido y no puede ser detectado fácilmente.

En general, el tratamiento de agua potable está orientado a remover color, turbiedad y microorganismos de origen fecal. Esta remoción se logra a través de una combinación adecuada de procesos de coagulación-floculación- sedimentación-filtración y desinfección. Pero cuando se desea remover elementos químicos del agua, como el arsénico, es necesario recurrir a métodos más complejos.

3.1. Arsénico

El arsénico es un metaloide que se encuentra en forma natural en el planeta tierra y es usado comercial e industrialmente en la elaboración de diferentes productos, tales como aditivo para preservar madera y alimentos. A mayores concentraciones también es utilizado para la elaboración de plaguicidas. Las concentraciones de As en aguas naturales usualmente son menores de $10 \mu\text{g/L}$. Sin embargo, en zonas mineras pueden encontrarse concentraciones entre 0,2 y 1 g/L.

Debido a que el arsénico se encuentra en el ambiente, el hombre se expone a éste elemento al ingerir alimentos, al tomar agua o al inhalar aire. Dependiendo del nivel de arsénico ambiental éste puede afectar la salud del hombre.

En diferentes estudios epidemiológicos se ha encontrado evidencias sobre el efecto en la salud por el consumo de agua con arsénico. Las enfermedades causadas por el arsénico son: hiperqueratosis palmar y plantar; hiper e hipopigmentación de cara, cuello y tórax, lesiones vasculares periféricas; cáncer a la piel, pulmón, hígado, riñón y vejiga.

Se sospecha que el arsénico tiene efectos cancerígenos por la correlación encontrada entre la incidencia de hiperquetosis y cáncer de la piel por un lado y la ingestión de aguas con más de 0,3 mg/L de arsénico por otro. Esta relación fue comprobada por Trelles en la Argentina.

Debido a sus efectos adversos sobre la salud y a la insuficiente información sobre su remoción del agua, la EPA y las guías canadienses recomiendan que el contenido de arsénico en fuentes de abastecimiento no exceda 0,05 mg/L. El valor guía de la OMS para el agua de bebida es 0,01 mg/L.

3.2. *Química del arsénico en el agua*

Numerosos estudios acerca de la movilidad del arsénico en el medio ambiente describen aspectos fundamentales de su comportamiento, distribución de especies químicas de arsénico en diversos entornos, reacciones de equilibrio fundamentales, rol de las interacciones del arsénico en interfaces sólidos-agua en la distribución, su acumulación en organismos, etc. (Nriagu, 1994, Ferguson et al, 1972).

En el ambiente acuático las valencias más comunes del arsénico en el agua son +3 (arsenito) y +5 (arsenato) tal formado las especies hidrolizadas inorgánicas H_3AsO_3 , $H_2AsO_3^-$, $HAsO_2^{2-}$ y AsO_3^{3-} (valencia +3), H_3AsO_4 , $H_2AsO_4^-$, $HAsO_4^{2-}$ y AsO_4^{3-} (valencia +5). El arsénico también se encuentra presente en menores concentraciones en forma orgánica. Se asume que la formación de estos compuestos proviene exclusivamente de la actividad de organismos vivos.

Solo en aguas de origen antropogénico se pueden esperar otras formas de arsénico diferentes de +3 y +5. Debido a las marcadas diferencias en el comportamiento químico de ambas formas del arsénico, es altamente recomendable conocer su distribución para un tratamiento eficiente de remoción de arsénico del agua.

Existen varias similitudes entre el comportamiento del arsénico y el fósforo en aguas naturales cuando el arsénico está presente como arsenato.

3.3. *Remoción de arsénico*

Las tecnologías para la remoción de arsénico se basan en uno proceso fisicoquímico o en la combinación de varios. Los métodos más conocidos de tratamiento de agua para remover arsénico se clasifican en a) Procesos de coagulación y precipitación, b) Intercambio iónico, c) Adsorción en lechos granulares de materiales que retienen arsénico, y d) Otros procesos. Para todos los procesos mencionados anteriormente se requiere de una oxidación completa de As (III). Esto se debe a que el As (III) se remueve en menor proporción que el As (V).

Por lo tanto cualquier tecnología de remoción incluye a la oxidación como pretratamiento.

✓ **Oxidación**

Para la oxidación del As (III) a As (V), se puede utilizar: el oxígeno atmosférico, hipoclorito y permanganato estos productos son los más usados en el proceso de oxidación de arsénico en los países en desarrollo.

Las unidades de tratamiento casero se utilizan básicamente para proporcionar agua segura de beber y para la cocción de alimentos de una familia, requieren cerca de 5 litros de agua per capita por día. Varias unidades de tratamiento casero se están proponiendo actualmente y otras están en desarrollo. Normalmente, el agua de una fuente afectada con arsénico se recoge y se vierte manualmente en las unidades.

Entre estas unidades tenemos, los procesos siguientes:

3.3.1. Adsorción y coprecipitación

Algunos tratamientos convencionales como la coagulación es un método efectivo en la remoción de arsénico. En este método se adiciona un coagulante, como pueden ser cloruro de aluminio o cloruro férrico, y mediante una mezcla rápida por aproximadamente un minuto. El hidróxido de Aluminio o el férrico forman los micro-flocs (coagulación). Entonces el agua se revuelve suavemente por algunos minutos (floculación) y la gran cantidad de los micro-flocs se aglomeran y forman flocs más grandes y estables. Durante la coagulación-floculación algunas micro-partículas y iones de carga negativa se unen a los flóculos. El arsénico también se une a los flocs (adsorción). Subsecuentemente se sedimenta y filtra (coprecipitación) separando así los flocs, junto con el arsénico que fue adsorbido.

Los coagulantes que son comúnmente usados son Alumbre, $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$; cloruro férrico, $FeCl_3$; y sulfato férrico, $Fe(SO_4)_3 \cdot 7H_2O$. Las sales férricas son comparativamente más eficientes basándonos en el peso y tiene un rango de pH entre 6,0 y 8,5. La alumbre es más efectiva en un rango de 7,2 – 7,5. En ambos casos, As (III) no se remueve eficazmente, pero el As (V) si se remueve. Por ello la oxidación antes de los procesos es altamente recomendado.

✓ Unidad de tratamiento con dos cubos

Este método se basa en el proceso de la coprecipitación. La unidad consiste en dos cubos, cada uno con capacidad de 20 litros. Se colocan normalmente uno sobre el otro. El agua contaminada con arsénico se vierte adentro del cubo superior. El producto químico entonces se agrega y se revuelve vigorosamente con un palo por uno o dos minutos. Luego se revuelve suavemente para la floculación por otros dos a tres minutos. El agua mezclada se deja reposar para que sedimente por cerca de dos horas. El producto químico agregado es una mezcla del coagulante (ejemplo: alumbre, cloruro o sulfato férrico) y oxidante (ejemplo: permanganato de potasio, hipoclorito de calcio) en forma de polvo.

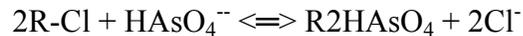
Después de sedimentar, los dos tercios superiores de agua flotante del primer cubo se vierten suavemente en el segundo cubo. El segundo cubo se llena a medias de la arena del filtro y tiene un tubo de desagüe inferior perforado conectado con un grifo externo. Cuando se abre el grifo el agua del cubo pasa a través de la arena del filtro, que quita los micro-flocs restantes.

La arena del filtro en el segundo cubo necesita limpiado manual una vez o dos veces una semana. También se necesita de capacitación en la operación y mantenimiento del sistema y en la prevención de contaminación bacteriológica del agua. La eficiencia varía con las habilidades de operación y mantenimiento de las unidades y de los parámetros de calidad del agua, especialmente el pH. Las sales férricas son las más eficientes en la remoción del arsénico.

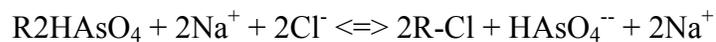
3.3.2. Intercambio iónico

Las resinas sintéticas para el intercambio iónico es un medio especial para la absorción. Es usado en tratamiento de agua para la remoción de iones indeseables substituyendo los iones unidos a la resina. Por el uso continuo la resina pierde capacidad de remoción y necesita ser regenerada.

La ecuación del intercambio de arsénico puede ser representada como sigue R representa el intercambio de iónico en la resina y el Cl⁻ es un ión unido a la resina.



La ecuación de regeneración usando sal común como agente regenerador es:



El intercambio iónico es muy efectivo cuando la forma de arsénico que predomina en el agua es As(V). En caso contrario se debe oxidar como un tratamiento previo a este proceso. Las resinas de intercambio aniónico pueden remover arsénico (arsenato) en concentraciones por debajo de 1µg/L si están comercialmente disponible.

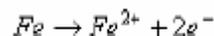
Las resinas sulfato-selectivas y nitrato-selectivas convencionales son recomendables para el retiro de arsénico. La capacidad de remoción depende del contenido de sulfato y nitrato contenida en el agua cruda y como se intercambian antes del arsénico.

3.3.3. Virutas de Hierro

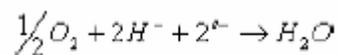
Básicamente el agua a tratar, idealmente saturada en oxígeno, se hace escurrir en un reactor donde se encuentra hierro metálico en forma de lana, viruta o similar que presenta una alta área superficial para maximizar la corrosión. En estas condiciones lugar las siguientes reacciones.

a) Reacciones óxido - reducción:

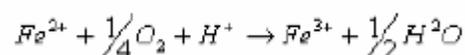
· Anódica



· Catódica



b) Oxidación ión férrico



Los productos de corrosión, siendo el $\text{Fe}(\text{OH})_3$ predominante, precipitan en forma de pequeñas partículas coloidales que lentamente se aglomeran y poseen la capacidad de retener arsénico por adsorción. La mayor parte del hierro oxidado con arsénico retenido abandona el reactor el cual posteriormente es separado por filtración.

Las ventajas más relevantes de este proceso son:

- No se requiere de productos químicos solo de hierro comercial de calidad corriente en forma de lana, residuos de la industria metalmeccánica (viruta) o similar.
- Fácil de operar.
- Residuos férricos de alta densidad, lo que facilita su disposición final.
- Los aspectos de operación esenciales de este proceso son:
 - La corrosión y adsorción de arsénico ocurren en forma simultánea.
 - Requiere de una máxima concentración de oxígeno disuelto en el agua a tratar.

Es necesario minimizar la acumulación de productos de corrosión de hierro sobre las superficies de hierro metálico para mantener una tasa de corrosión constante. Se debe ajustar la tasa de corrosión de acuerdo al contenido de arsénico del agua.

3.3.4. Remoción de arsénico asistida por luz solar (RAOS)

Para abatir la contaminación por arsénico en zonas aisladas se propuso otra tecnología muy simple: la remoción de arsénico por oxidación solar (RAOS). El método es una variante de las tecnologías bien conocidas de remoción de arsénico con flóculos de hidróxidos de aluminio o de hierro. Para que la remoción sea eficaz, es necesario que el arsénico se encuentre en su forma oxidada, el arseniato AsO_4^{3-} , y no en su forma reducida, el arsenito AsO_3^{3-} .

RAOS busca generar el flóculo de hidróxido de hierro por oxidación solar de sales de hierro en presencia de citrato y de aire. Las reacciones fotoquímicas que tienen lugar no sólo generan el precipitado de hidróxido de hierro, sino que simultáneamente promueven la formación de especies muy activas que oxidan el arsénico a arseniato, el cual se adsorbe en el flóculo. El citrato se agrega en forma de jugo de limón al agua (que generalmente ya posee hierro) contenida en botellas plásticas que se exponen al sol por algunas horas. Durante la noche las botellas se colocan en posición vertical. Así, el hierro y el arsénico floculan y el agua purificada se decanta de las partículas o se filtra a través de simples paños textiles.

✓ **Descripción del método**

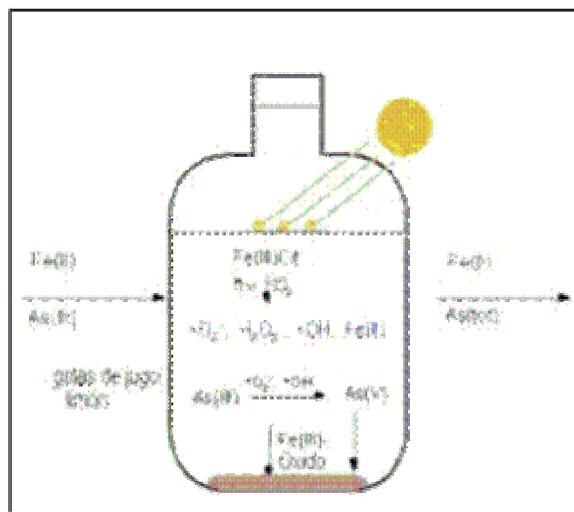
RAOS es un método de tratamiento de muy bajo costo y de fácil manejo para remover el arsénico presente en las aguas naturales de zonas rurales, haciendo a estas aguas aptas para consumo humano.

Este método se basa en la formación del complejo citrato de Fe(III), que permite la oxidación del As(III) a As(V) a través de especies activas formadas por irradiación con luz solar en presencia de oxígeno. El As(V) se adsorbe fuertemente sobre el precipitado de hidróxido de hierro que se forma en esas condiciones, y floccula. Se agregan al agua algunas gotas de jugo de limón y una solución de Fe(II) como sal de Mohr ($\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$).

Este tratamiento se realiza en botellas de plástico, que se exponen al sol por algunas horas. Las botellas se colocan luego en posición vertical durante la noche, para que decanten las partículas de hidróxido de hierro conteniendo el As(V), y luego se filtra a través de paños textiles o algodón.

Como puede deducirse, este método no requiere equipos caros, ni elevados costos de energía. Sólo necesita la acción permanente del sol, y es, por lo tanto, aplicable a regiones con alta incidencia de radiación diurna, es decir, con más de 3000 horas de sol en promedio por año.

Esta tecnología ha sido aplicada con bastante éxito en países como Colombia, Tailandia, México y Bangladesh.



B) Remoción turbiedad

1. Turbiedad

La turbiedad es originada por las partículas en suspensión o coloides (arcillas, limo, tierra finamente dividida, etc.). La figura 1 muestra la distribución de las partículas en el agua de acuerdo con su tamaño. La turbiedad es causada por las partículas que forman los sistemas coloidales; es decir, aquellas que por su tamaño, se encuentran suspendidas y reducen la transparencia del agua en menor o mayor grado.

La medición de la turbiedad se realiza mediante un turbidímetro o nefelómetro. Las unidades utilizadas son, por lo general, unidades nefelométricas de turbiedad (UNT).

Últimamente, ha cobrado importancia la presencia de fibras de asbesto desprendidas de los accesorios de asbesto-cemento de los sistemas de distribución como un factor causante de turbiedad en las aguas de consumo humano.

En la práctica, la remoción de la turbiedad no es un proceso difícil de llevar a cabo en una planta de clarificación de agua; sin embargo, es uno de los que más influye en los costos de producción, porque, por lo general, requiere usar coagulantes, acondicionadores de pH, ayudantes de coagulación, etc.

El diseño de los sistemas de remoción de turbiedad debe considerar no sólo el tipo de partículas existentes (origen, estructura, composición y forma) sino también su tamaño y comportamiento.

Aunque no se conocen los efectos directos de la turbiedad sobre la salud, esta afecta la calidad estética del agua, lo que muchas veces ocasiona el rechazo de los consumidores. Por otra parte, como señala Castro de Esparza, los estudios elaborados por Tracy y por Sanderson y Kelly han demostrado que en el proceso de eliminación de los organismos patógenos, por la acción de agentes químicos como el cloro, las partículas causantes de la turbiedad reducen la eficiencia del proceso y protegen físicamente a los microorganismos del contacto directo con el desinfectante. Por esta razón, si bien las normas de calidad establecen un criterio para turbiedad en la fuente de abastecimiento, esta debe mantenerse mínima para garantizar la eficacia del proceso de desinfección.

Los estándares internos de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) establecen que las aguas de consumo humano deben tener preferentemente una UNT y en ningún caso más de 5 UNT. Las Guías de Calidad para Agua de Bebida del Canadá y las Guías de Calidad para Aguas de Consumo Humano de la Organización Mundial de la Salud (OMS) recomiendan como valor guía 5 UNT. La OMS indica, sin embargo, que para una desinfección eficiente, el agua filtrada debería tener una turbiedad promedio menor o igual a una UNT.

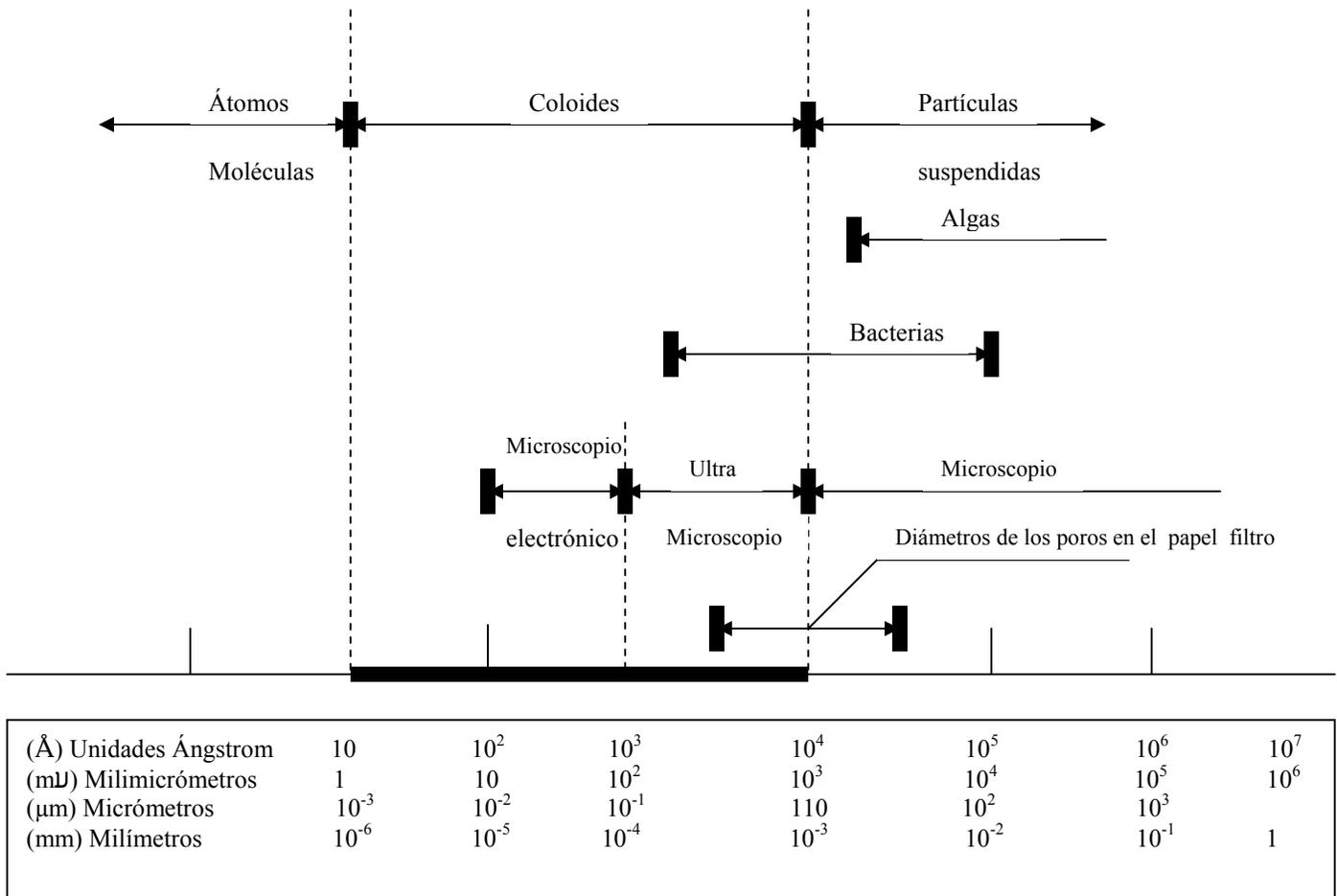


Figura 1. Distribución de tamaños de las partículas en el agua.

2. Sedimentación

La sedimentación es el proceso mediante el cual se eliminan o se separan las partículas suspendidas más pesadas que el agua. Cuando las impurezas son separadas del agua por la acción de la gravedad y sin la ayuda de agentes químicos, la operación se denomina SEDIMENTACION SIMMPLE.

Finalmente, cuando se utilizan agentes químicos para eliminar impurezas en solución, la operación se denomina PRECIPITACIÓN QUÍMICA.

En el tratamiento del agua se aplica en la eliminación de impurezas floculadas, tales como el color y la turbidez. Así como en la eliminación de impurezas precipitadas, tales como la dureza, el fierro y el manganeso.

3. Coagulación, mezcla y floculación

La coagulación es un proceso en el que sustancias químicas son añadidas a un sistema de agua con el objeto de crear u originar agregados de elementos finamente divididos, para que sedimenten rápidamente.

La mayoría de las partículas que se presentan en aguas naturales son compuestas de sílice, o minerales similares, con una gravedad específica de 2,65. La sílice en la forma de arena (0,1 a 2 mm) sedimenta rápidamente en agua. Sin embargo, en estado fino la separación por gravedad es lenta.

Se denomina mezcla rápida a las condiciones de intensidad de agitación y tiempo de retención que debe reunir la masa de agua en el momento en que se dosifica el coagulante, con la finalidad de que las reacciones de coagulación se den en las condiciones óptimas correspondientes al mecanismo de coagulación predominante.

El objetivo principal de la floculación es reunir las partículas desestabilizadas para formar aglomeraciones de mayor peso y tamaño que sedimenten con mayor eficiencia.

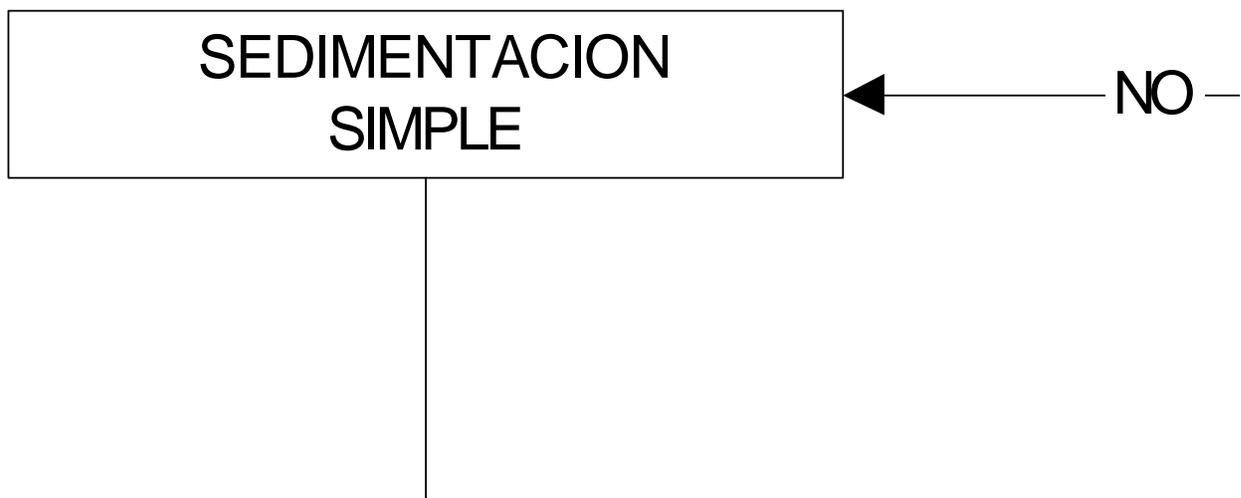
4. Filtración

A pesar de la aplicación de los procesos mencionados, el agua aún contiene sólidos en suspensión, es por ello que se debe utilizar la filtración.

La filtración consiste en la remoción de partículas suspendidas y coloidales presentes en una suspensión acuosa que escurre a través de un medio poroso. En general, la filtración es la operación final de clarificación que se realiza en una planta de tratamiento de agua y, por consiguiente, es la responsable principal de la producción de agua de calidad coincidente con los estándares de potabilidad.

El avance logrado por la técnica de filtración es el resultado de un esfuerzo conjunto dirigido a lograr que la teoría exprese los resultados de las investigaciones experimentales, de tal modo que sea posible prever, en el diseño, cómo va a operar la unidad de filtración en la práctica.

METODOS DE TRA



5. Métodos de remoción

5.1 Filtro de arena

Este filtro usa arena seleccionada de 0,3 mm de tamaño efectivo y 2,0 de coeficiente de uniformidad. La tasa de filtración se controla mediante un reductor de caudal confeccionado con un microtubo de un milímetro de diámetro interior y 20 centímetros de longitud. La tasa de filtración mínima que se puede obtener con un volumen de agua de ocho litros es de $0,68 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \times \text{día})$ equivalente a 1,7 litros de agua por hora o un volumen de 40 litros por día de agua filtrada. A fin de evitar el ingreso de arena al interior del microtubo que pudiera perjudicar su funcionamiento, se coloca en un extremo del microtubo una almohadilla de geotextil que actúa como drenaje.

La instalación del reductor de caudal se realiza cubriendo totalmente con arena uno de los extremos que lleva la almohadilla; mientras que, el otro extremo sale al exterior a través de un orificio hecho en el balde a la altura del nivel superior de la capa de arena (véase figura 1).

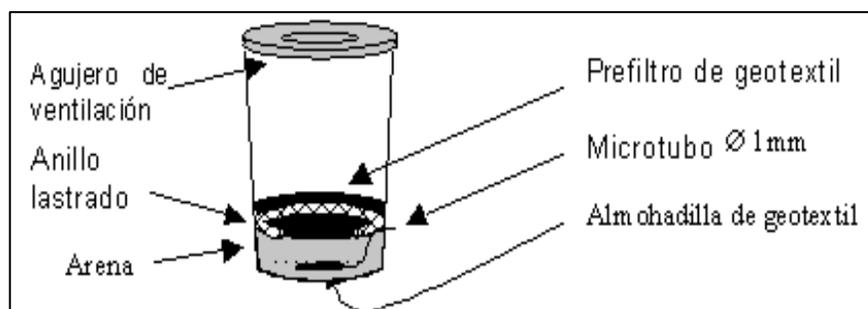


Figura 1. Características del filtro de arena.

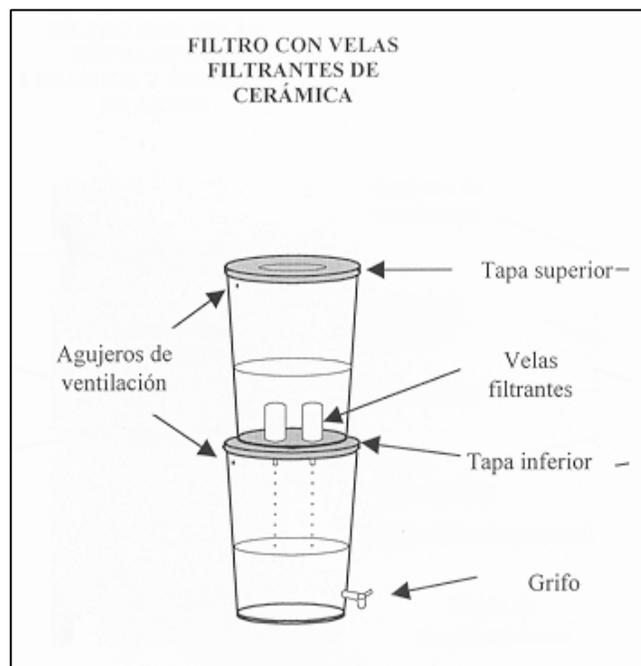
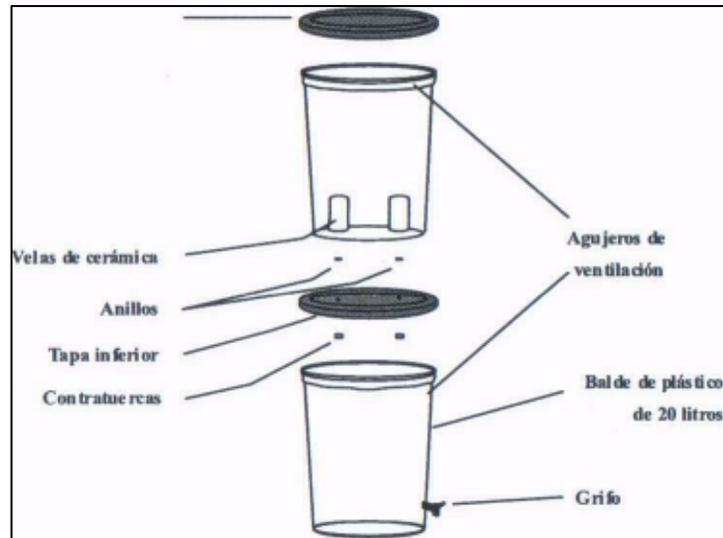
Para no perturbar la superficie de arena por el llenado de agua de la unidad de filtración, se coloca una pieza de geotextil sujeta con un anillo hecho de manguera plástica y relleno con arena para darle mayor peso y evitar que flote.

5.2 Filtro con velas filtrantes de cerámica

Este filtro de mesa está compuesto por dos baldes de polietileno de alta densidad de 20 litros cada uno. Estos son colocados uno sobre la tapa del otro, de manera que el balde superior contenga las dos velas filtrantes.

Para este fin, en la base del balde superior y la tapa del balde inferior se perforan dos agujeros coincidentes donde se insertan las espigas de las velas filtrantes. Entre la base del balde y la tapa inferior se colocan anillos de plástico coincidentes con las espigas de las velas a fin de darle mayor rigidez a la unión cuando se aseguren los elementos filtrantes y de este modo, evitar la fuga de agua.

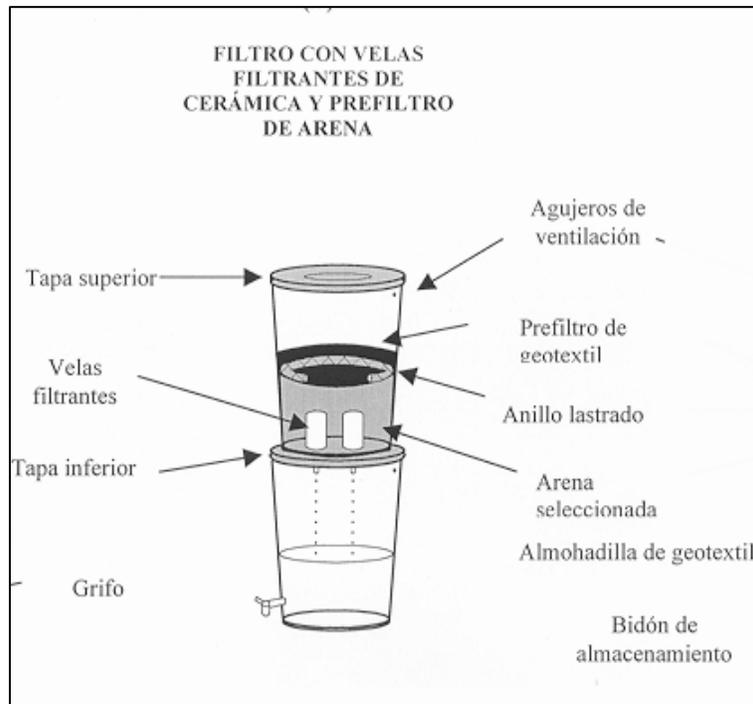
Este conjunto se coloca sobre un segundo balde al cual se le perfora en la parte superior un agujero de ventilación de 3mm de diámetro para facilitar la filtración del agua.



5.3 Filtro con velas filtrantes de cerámica y prefiltro de arena

Las características constructivas de este filtro son similares al anterior, a excepción que se coloca sobre las velas, una capa de arena seleccionada de un tamaño efectivo de 0.3mm y un coeficiente de uniformidad de 2. La capa de arena debe cubrir los elementos filtrantes hasta 5 centímetros por encima de la parte superior del elemento filtrante.

Para no perturbar la superficie de la arena por el llenado de agua de la unidad de filtración, se coloca encima de la capa de arena, una pieza de geotextil sujeta con un anillo hecho de manguera plástica y relleno con arena para darle mayor peso y evitar que flote.



5.4 *Micro y nanofiltración.*

La presencia de quistes y oocitos de *Cryptosporidium* y *Giardia*, así como otros parásitos en las fuentes de agua potable, ha iniciado un nuevo campo de aplicación para las membranas en el sector de agua potable. La ineficiencia de las plantas de filtración convencionales para filtrar y desinfectar estos agentes patógenos del agua potable ha obligado a los ingenieros a buscar nuevas tecnologías. Las membranas son la respuesta natural a estos problemas ya que son barreras absolutas para aquellos parásitos cuyo tamaño excede el tamaño del poro de la membrana.

Por lo general, los procesos de tratamiento convencionales no son muy efectivos cuando el color y el carbono orgánico total (COT) están presentes en altos niveles en el agua de alimentación. Debido a que las porciones coloidales y suspendidas de estos componentes son relativamente altas, no se pueden remover fácilmente mediante sedimentación y filtración por gravedad.

Finalmente, los altos niveles de hierro y manganeso en las aguas de pozo han sido difíciles de tratar con el método convencional de la arena verde. Por lo tanto, estas aguas son buenas candidatas para plantas con tecnologías de membrana.

Las membranas de microfiltración (MF) y nanofiltración se están usando cada vez más en el campo del agua potable. En el caso de algunas aplicaciones, las membranas MF ya constituyen una tecnología comprobada. Esto incluye la remoción de quistes y oocitos de *Cryptosporidium* y *Giardia*, así como la remoción de la turbiedad mediante la microfiltración y el tratamiento de agua salobre o con color mediante la nanofiltración.

Las ventajas relacionadas con el uso de membranas en el tratamiento de agua potable son: poco requerimiento de energía, efecto de barrera absoluta para microorganismos, menor requerimiento de cloro para la desinfección, uso reducido de productos químicos (en caso se usen), menor tamaño de la planta. El tipo de membrana usado también tiene ciertas ventajas específicas.

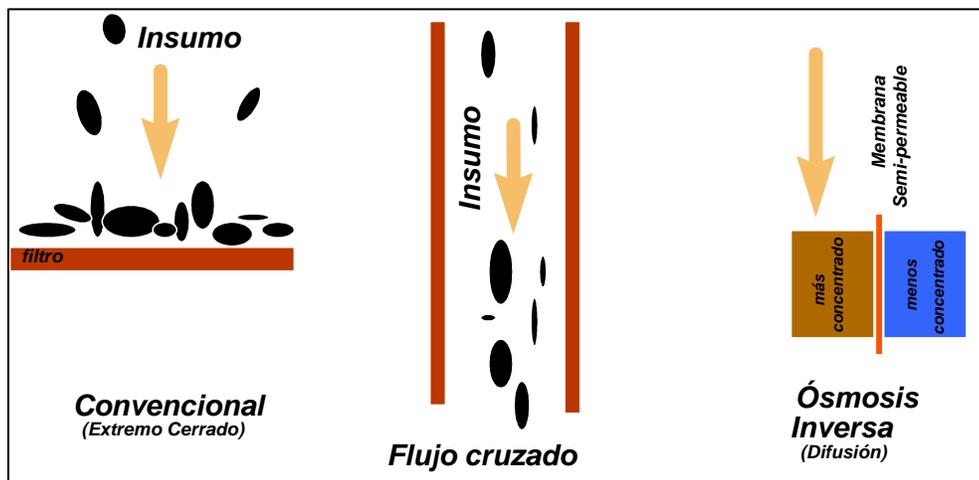
Este documento presentará las aplicaciones típicas de ambos tipos de membranas en el área de agua potable. Los temas tratados aquí son:

- Remoción de turbiedad y parásitos mediante la microfiltración directa - desinfección mediante MF.
- Remoción de Fe y Mn mediante la combinación de oxidación y microfiltración.
- Remoción de color y COT mediante la combinación de coagulación mejorada con microfiltración.
- Remoción de color y COT mediante la nanofiltración.

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

Las membranas requieren presión transmembránica para conducir el agua limpia a través de la membrana, dejando detrás el concentrado que contienen las partículas y los sólidos separados. La presión transmembránica requerida para operar las plantas con tecnología de membrana puede ser inducida por presión o vacío.

De igual manera, existen diversas vías de filtración que comúnmente se encuentran en las membranas: la filtración de extremo cerrado, donde el filtrado forma una torta a medida que el filtro se obstruye; la filtración de flujo cruzado, donde el filtrado es removido de la membrana, lo que evita la obstrucción rápida del filtro; y la ósmosis, donde se filtra el agua a través de una membrana semipermeable. Este documento se centrará en membranas de filtración con flujo cruzado.



5.5 Filtro de arena y grava

✓ Prefiltro vertical de flujo ascendente

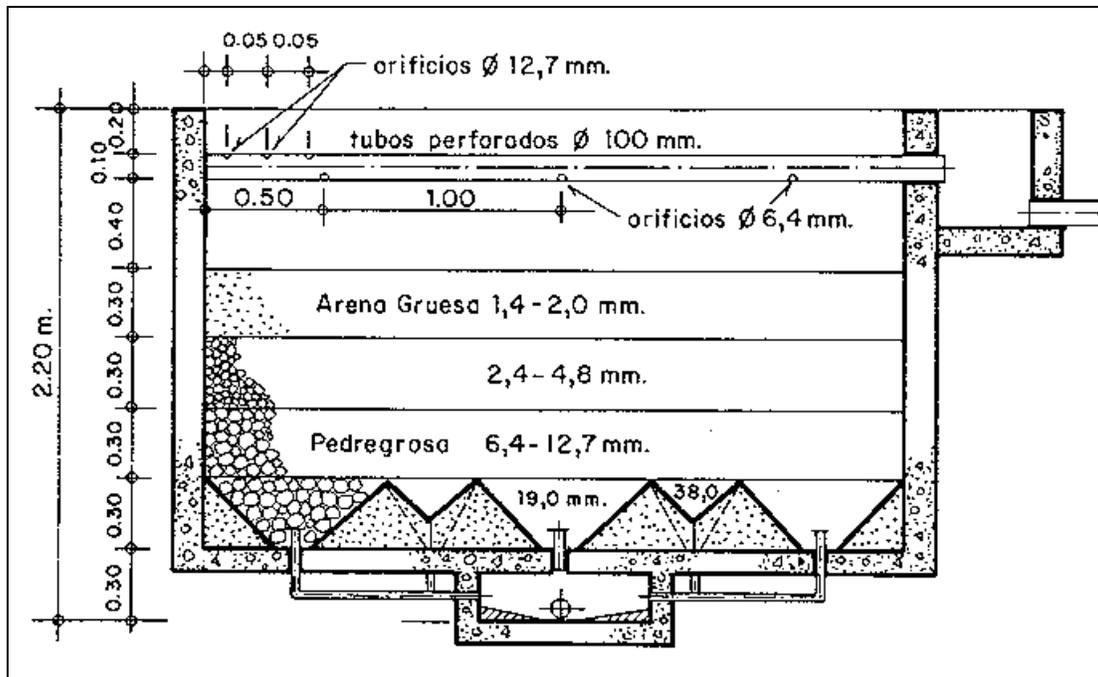
- Descripción

En unidades grandes (3,0 a 4,0 m de diámetro), la tubería de agua cruda ingresa por el fondo de la unidad a una caja de distribución. De la caja de distribución parten 12 tubos de 1" de diámetro con perforaciones de 6,4 mm y 12,7 mm, que ingresan a los troncos de cono que conforman el falso fondo de los prefiltros. Este tipo de falso fondo permite una distribución uniforme del flujo en toda el área del prefiltro. Los troncos de cono se llenan de grava de 19 mm a 38 mm.

En unidades pequeñas de 1,0 a 1,20 m de diámetro, la tubería ingresa por el eje del prefiltro hasta el fondo de la unidad, desde donde es distribuida uniformemente en toda el área mediante tuberías secundarias perforadas.

En el caso en que la tubería llega a una caja de distribución, de ésta parten tubos de 1" de diámetro con perforaciones de 6,4 mm y 12,7 mm, que ingresan a troncos de cono que conforman el falso fondo de los prefiltros. Este tipo de falso fondo permite una distribución uniforme del flujo en toda el área del prefiltro. Los troncos de cono se llenan de grava de 19 mm a 38 mm.

La zona de prefiltración está constituida por dos capas de grava de 6,4 a 2,7 mm y de 2,4 a 4,8 mm, de 0,30 m de espesor cada una y una capa de arena gruesa de 1,4 a 2,0 mm de altura en la superficie del lecho.



El sistema de recolección de agua tratada está conformado por tuberías de f 4" con orificios de f 12,7 mm a 0,05 m, centro a centro, que conducen el efluente a una caja de recolección. Este sistema se ubica a 0,40 m sobre la superficie del medio filtrante.

Cuando la planta se inicie con los prefiltros se deberá anteponer una caja de medición de caudal y distribución a las unidades, consistente en un vertedero triangular y dos rectangulares. En el caso de que se proyecten más de dos prefiltros, se diseñará un canal de distribución uniforme a todas las unidades ubicadas en paralelo.

- **Ventajas**

Investigaciones efectuadas con este tipo de unidades operando en serie con filtros lentos sugieren que este conjunto puede remover hasta 5,0 mg/l de fierro total, 0,5 mg/l de manganeso, 750 unidades de algas/ml, 2,000 coliformes fecales/100 ml de muestra y puede tratar aguas hasta con 5,0 mg/l de DBO5.

La remoción global de microorganismos vivos y partículas es superior a 80%, siempre que no se produzcan variaciones bruscas de la calidad del afluente.

- **Restricciones**

Turbiedades afluentes no mayores de 100 UNT.

Poca capacidad de asimilación de variaciones repentinas de calidad de agua.

Para la construcción de unidades grandes con drenaje de caja de repartición y troncos de cono, se requiere de mano de obra calificada.

5.6 *Filtro de grava*

Estas unidades de prefiltración en grava o de filtración gruesa, como también se denominan, pueden ser de dos tipos, dependiendo del sentido del flujo horizontal y vertical. Los de flujo vertical pueden ser, a su vez, de dos tipos: descendentes y ascendentes.

✓ **Prefiltro de flujo horizontal**

- *Descripción*

Para establecer el caudal de operación de todo el sistema, si ésta es la primera unidad del sistema de tratamiento considerado, deberá anteponerse una caja de concreto con un vertedero triangular.

La estructura de entrada está constituida por un canal y un muro de ladrillo hueco, cuya función es distribuir uniformemente el caudal en toda la sección.

La zona de filtración está conformada por canales divididos en tres o más tramos llenos de grava de diferentes diámetros, dispuestos en sentido decreciente.

La longitud de los tramos es variable y depende de la calidad del agua, del tamaño de la grava y de la velocidad de filtración.

Las paredes anteriores y posteriores de cada tramo deberán ser muros de ladrillo hueco, para permitir una distribución uniforme y adecuada del flujo.

Cada tramo debe tener su sistema de limpieza, consistente en una tolva para facilitar el deslizamiento y depósito del sedimento, un canal de evacuación de lodos techado con losas de concreto separadas por ranuras, compuerta y cámara de drenaje. Las ranuras o separaciones de las losas del canal se diseñan para obtener una velocidad de descarga que asegure la extracción instantánea de la mayor parte del lodo contenido en la tolva. Las tolvas estarán rellenas con piedra de 2" a 3" de diámetro.

La estructura de salida está constituida por un muro de ladrillo hueco y un canal independiente para cada unidad.

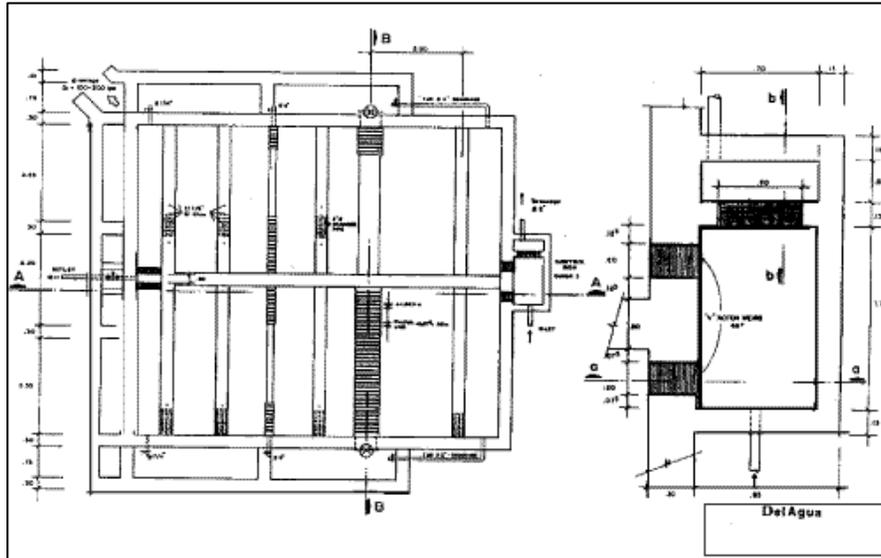


Figura 2. Prefiltro de grava de flujo horizontal.

- ***Ventajas***

En general, son más eficientes que los sedimentadores por la gran superficie específica disponible en la grava. Cuando opera con carreras largas, no sólo remueve partículas inertes, sino también microorganismos.

Las carreras de trabajo se pueden alargar mediante descargas hidráulicas y el lavado de la grava se puede distanciar, por lo menos, hasta que concluya la época de lluvia. Es posible lograr una periodicidad de dos a tres años, dependiendo de la turbiedad máxima del afluente.

- ***Restricciones***

Profundidades mayores de 1,5 m y anchos mayores de 5,0 m dificultan la limpieza de la unidad. En general, se recomiendan profundidades no mayores de 1,0 m y anchos máximos de 4,0 m. Estas recomendaciones restringen el uso de estas unidades a caudales pequeños; la otra alternativa es considerar muchas unidades en paralelo

Turbiedades mayores de 300 UNT demandan unidades de 8 a 16 m de largo.

✓ **Prefiltro vertical múltiple de flujo descendente**

- ***Descripción***

Esta unidad consta de tres compartimientos operando en serie, con velocidades y tamaños de grava decrecientes entre el primero y el último.

El afluente ingresa a los compartimientos por vertederos ubicados por encima del nivel máximo de operación de la unidad.

Cada compartimiento consta de un tanque de sección rectangular lleno de grava de tamaño uniforme. La tasa de velocidad depende de la calidad del agua y del tamaño de grava seleccionado.

El sistema de drenaje es similar al del prefiltro horizontal.

La estructura de salida de cada compartimiento consta de un canal que se comunica con el compartimiento de la grava a través del sistema de drenaje; de tal manera que el agua percola a través de la grava, pasa por el canal de drenaje y asciende por el canal de salida, hasta alcanzar el vertedero que comunica con el siguiente compartimiento de la unidad.

Prefiltros de grava verticales de flujo descendente

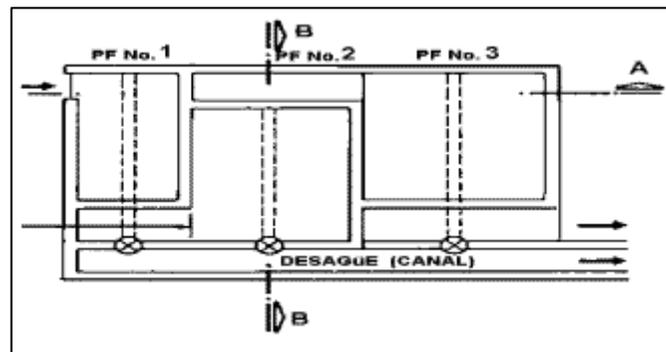


Figura 3. Planta y cortes.

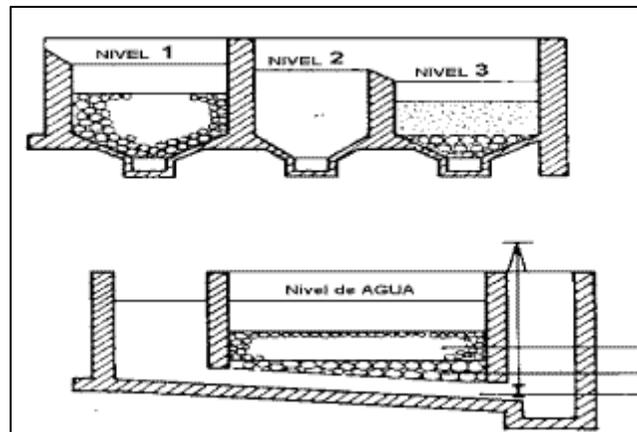


Figura 4. Unidad en funcionamiento.

Puede tomar un rango de turbiedad mayor que el horizontal y que el vertical ascendente. La velocidad de descarga durante las limpiezas no afecta a los compartimientos adyacentes, porque cada tanque es independiente. Por consiguiente, el llenado de los compartimientos puede hacerse a un caudal mayor al de diseño de la unidad para acelerar esta operación.

La limpieza completa es más ágil que en los otros casos, porque la altura de la grava en cada compartimiento es de sólo 50 cms. Incluso puede ejecutarse dentro del mismo compartimiento.

Al operar con carreras largas (turbiedades bajas) y buena supervisión, se han detectado eficiencias de remoción de coliformes fecales de 98% con aguas crudas, con un contenido inicial de 3,3 (10)³ (3).

- **Restricciones**

Normalmente se pueden tratar turbiedades medias de 100 a 400 UNT, pudiendo tomar límites máximos de 500 a 600 UNT. Se pueden tratar turbiedades superiores a las 1,000 UNT, con velocidades bajas de filtración, intensificando las descargas hidráulicas y con supervisión constante. En caso contrario, debe considerarse un presedimentador para atenuar la turbiedad afluente a la unidad.

C) Métodos alternativos de desinfección

La desinfección es el proceso que se lleva a cabo para eliminar o controlar los microorganismos en el agua que pudieran afectar negativamente su calidad, causando, entre otras cosas, enfermedades debidas a la actividad microbiana. Debe notarse la diferencia entre desinfección y esterilización, la cual destruye todos los organismos (Hooper, 1987).

La desinfección implica la exposición de los microorganismos a condiciones físicas o químicas a fin de destruirlos o detener su crecimiento. En realidad, lo que se observa son poblaciones de organismos y no individuos y esto resulta en un efecto cinético en términos de la tasa de mortalidad, donde el criterio de muerte de un microorganismo es la pérdida irreversible de la habilidad para reproducirse.

Hasta hace poco tiempo se consideraba que para establecer la calidad bacteriológica del agua era suficiente con determinar la cuenta de organismos coliformes totales y fecales. Sin embargo, se ha encontrado que existe una escasa correlación entre la presencia de estas bacterias con la de otros organismos patógenos. En 1986, en Estados Unidos de Norteamérica, las reformas al Acta del Agua Segura para el Consumo (SDWA, por su sigla en inglés), fijaron como objetivos adicionales de la desinfección, antes de la distribución, los siguientes:

- Asegurar la inactivación del 99.9% (3 log) y 99.99% (4 log) de quistes de *Giardia lamblia* y virus entéricos, respectivamente.
- Asegurar el control de otros microorganismos dañinos.
- No impartir toxicidad al agua desinfectada.
- Minimizar la formación de subproductos indeseables en la desinfección.

- Cumplir con los niveles máximos de contaminantes para los desinfectantes utilizados y los subproductos que pudieran formar.

La difusión de métodos alternativos como la adición de sustancias químicas, el tratamiento con ozono o luz ultravioleta, la ebullición y algunos tipos de filtración se ve limitada debido a los problemas asociados con la confiabilidad, operación, mantenimiento, costos, sabor resultante y particularmente, en el caso de la ebullición, la disponibilidad de fuentes de abastecimiento de combustible. Uno de los métodos más simples y menos costosos de proveer de agua segura para el consumo humano a las comunidades rurales es el uso de la radiación solar para inactivar bacterias y otros patógenos.

1. Procesos térmicos de desinfección

Las altas temperaturas tienen un marcado efecto sobre todas las clases de microorganismos. A altas temperaturas las células vegetativas mueren debido a la desnaturalización de las proteínas y la hidrólisis de otros componentes. En el agua, las bacterias mueren entre los 40 y los 100°C, mientras que las algas, protozoarios y hongos lo hacen entre los 40 y los 60°C. Las esporas requieren condiciones de calor mucho más rigurosas para destruirse: 120°C en calor húmedo (vapor) durante 20 min o 170°C en calor seco durante 90 min, (Hooper, 1987).

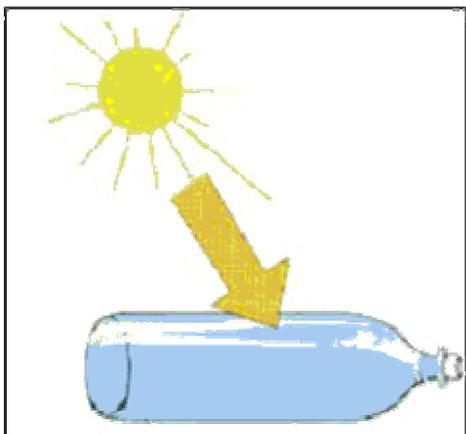
1.1 Desinfección solar del agua (SODIS)

La desinfección solar del agua (SODIS) es una solución simple, de bajo costo y ambientalmente sostenible para el tratamiento de agua para consumo humano a nivel doméstico, en lugares en los que la población consume agua cruda y microbiológicamente contaminada. El agua para consumo humano se obtiene exponiendo al sol por algunas horas el agua contaminada en botellas de plástico transparente de politereftalato de etileno (PET).

El método SODIS usa la energía solar para destruir los microorganismos patógenos que causan enfermedades transmitidas por el agua y de esa manera mejora la calidad del agua utilizada para el consumo humano.

Los microorganismos patógenos son vulnerables a dos efectos de la luz solar: la radiación en el espectro de luz UV-A (longitud de onda 320-400nm) y el calor de la radiación infrarroja que calienta el agua a unos 50-55°C e inactiva bacterias y virus (incluyendo al *Vibrio cholerae*). Se produce una sinergia entre estos dos efectos, ya que el efecto combinado de ambos es mucho mayor que la suma de cada uno de ellos independientemente. No se conocen bien los mecanismos involucrados, pero se cree que el proceso induce cambios en los ácidos nucleicos de los microorganismos.

Como las botellas de plástico son fácilmente accesibles a la población y el agua puede consumirse desde las mismas botellas, el método es extremadamente viable. Si es necesario acortar los tiempos de irradiación o si la radiación solar disponible no es suficientemente alta, se puede colocar la botella para su irradiación sobre una base semicilíndrica forrada con papel de aluminio, o se puede pintar de negro la parte inferior externa de la botella.



SODIS es ideal para desinfectar pequeñas cantidades de agua con baja turbiedad. Se llena el agua contaminada en botellas de plástico transparente, las cuales se exponen a la luz solar durante seis horas. La exposición al sol destruye los patógenos. Cuando la nubosidad es mayor de 50%, es necesario exponer las botellas de plástico durante dos días consecutivos para obtener agua segura para el consumo humano.

Sin embargo, si la temperatura del agua supera los 50°C, una hora de exposición es suficiente para obtener agua segura. Es posible mejorar la eficacia del tratamiento si las botellas de plástico se exponen a la luz solar mediante superficies

reflectoras como calaminas de aluminio o fierro corrugado.

1.2 Reflectores solares

El calentador solar comercial que se utiliza para desinfectar agua no difiere de los calentadores que se ven en muchos techos de viviendas y que son usados para calentar agua para cocina o ducha.

Está compuesto por un colector que es una caja con marco de aluminio y cubierta de vidrio. El colector contiene tubos de cobre, pintados de color negro, soldados a dos tubos cabezales y que almacenan el agua en proceso de calentamiento. Este colector está conectado por medio de tubos del mismo material, a un tanque-termo hecho de plástico, fibra de vidrio y aislado con espuma de poliuretano para almacenamiento del efluente tratado. Algunos de estos tanques están divididos para permitir un intercambio de calor entre el agua fría que entra y el agua caliente que sale.

✓ Destiladores solares

Una de las aplicaciones térmicas de la energía solar que puede manejarse con tecnología desde simple hasta muy sofisticada, es precisamente la producción de agua potable a partir de agua de mar o de agua dulce con algún problema de contaminación.

El principio de operación de la desinfección del agua mediante energía solar es el mismo que el que utiliza la naturaleza en el ciclo hidrológico: se evapora el agua del embalse que tiene presencia de sales y se condensa en otra parte, donde se obtiene agua purificada. Este proceso es fácil de lograr en lo que se conoce como destilador solar o más correctamente como destilador solar.

Principio de funcionamiento: en un destilador solar se requiere de un elemento que transforme la energía solar en un incremento de temperatura del agua para poder evaporarla, es decir, un colector solar. La radiación visible e infrarroja es absorbida por

cualquier superficie de "color" negro mate. El acabado mate es usado para lograr una mejor absorción y evitar pérdidas de una fracción de luz por reflexión.

En los destiladores solares más simples, el colector solar consiste en una charola horizontal, de color negro, que contiene el agua que se quiere destilar, a la que se le denomina destilando. La superficie negra de la charola absorbe la radiación solar, lo que se traduce en un ligero calentamiento que inmediatamente se transmite al agua.

Así, a medida que el sol sube sobre el horizonte en la mañana, el destilando va aumentando su temperatura hasta llegar a un máximo un poco después del medio día para luego enfriarse al ir declinando el sol.

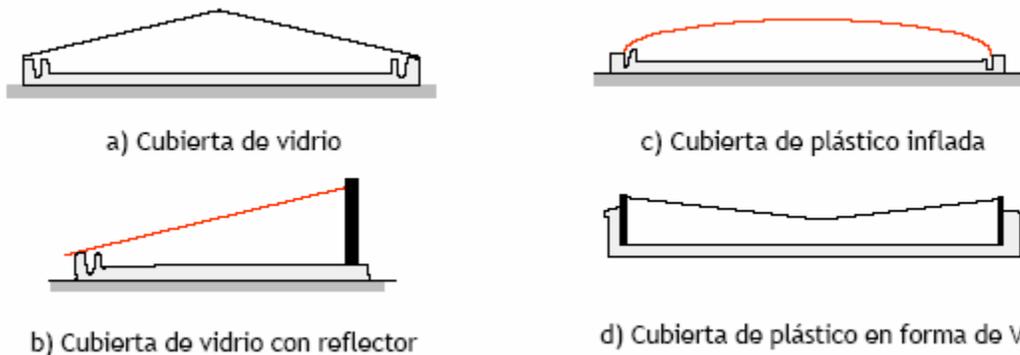
Para evitar las pérdidas indeseables de calor, es necesario que la charola esté aislada térmicamente por la parte inferior. Un destilador bien aislado no debe sentirse caliente por la parte inferior. El calentamiento del destilando produce un incremento en su presión de vapor. Esta presión de vapor es mucho mayor que la de las sales minerales, lo que hace que al calentar una solución, el agua se evapore mientras las sales se retienen en la charola, por lo que se logra una separación eficiente. Para facilitar la evaporación, conviene que el evaporador tenga un área grande comparada con el volumen de destilando que puede contener.

Una vez que el agua, libre ya de sales, se encuentra en forma de vapor, es necesario volverla a la fase líquida sobre una superficie limpia para después extraerla del destilador. Esto se logra en lo que se conoce como el condensador y generalmente es una cubierta de vidrio o algún otro material transparente colocado sobre el evaporador a una distancia e inclinación adecuadas

Existen varios diseños de condensadores. El más simple consiste en un caseta de vidrio de dos aguas, con una inclinación de alrededor de 20° con respecto a la horizontal, lo cual permite que las gotas de agua condensada escurran hacia abajo en donde se colectan en pequeños canales.

Construcción: en un destilador solar, la charola o colector puede construirse de diversos materiales que sean resistentes al agua y a la temperatura de unos 80°C. Se han construido colectores-evaporadores de lámina de hierro, de plástico reforzado con fibra de vidrio, de mampostería, de madera, de ferrocemento, etc. El material más utilizado como condensador es el vidrio o algunos plásticos como el acrílico, el polietileno, el polivinilo y el poliéster, aunque estos últimos tienden a degradarse más rápidamente por la radiación solar y a opacarse con el tiempo.

Los aislantes térmicos a los lados y abajo del destilador, son muy importantes. Resultan muy útiles el corcho y las espumas sólidas de diversos materiales plásticos como el polietileno, poliuretano y poliestireno. También son buenos aislantes el aserrín (viruta de madera), la lana de fibra de vidrio, el cartón corrugado y el papel en capas. Muchos sólidos no metálicos pueden funcionar como aislantes y serán mejores en cuanto menor sea su densidad y mayor su espesor.

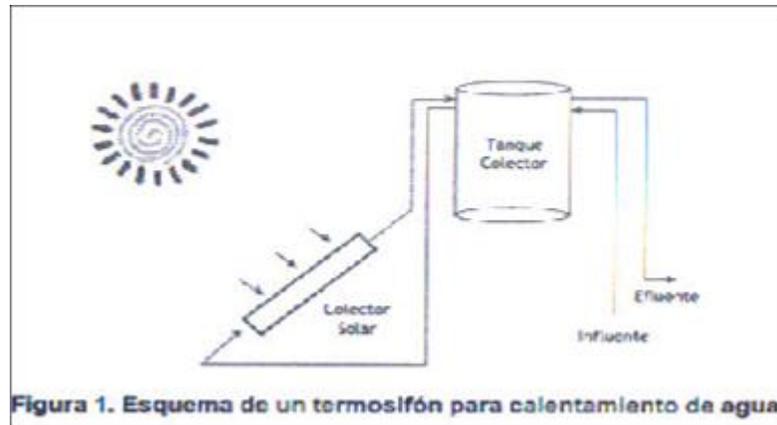


✓ **Esquema de un termosifón para calentamiento de agua**

El principio de funcionamiento de estos sistemas es conocido como circuito convectivo o calentador solar pasivo, donde el calor de la radiación solar es absorbido por los tubos negros lo que causa un incremento en la temperatura del agua dentro del colector y una consecuente disminución en la densidad de ésta. En estas condiciones la columna de agua fría en la tubería de retorno al colector ya no queda equilibrada por la columna de agua caliente menos densa, por lo que la gravedad origina que la primera baje y desplace a la última hacia el tanque que está más arriba. Esta circulación natural conocida como “termosifón” continúa mientras exista suficiente calor para aumentar la temperatura del agua y la fuerza de empuje resultante pueda vencer la caída de presión en el sistema.

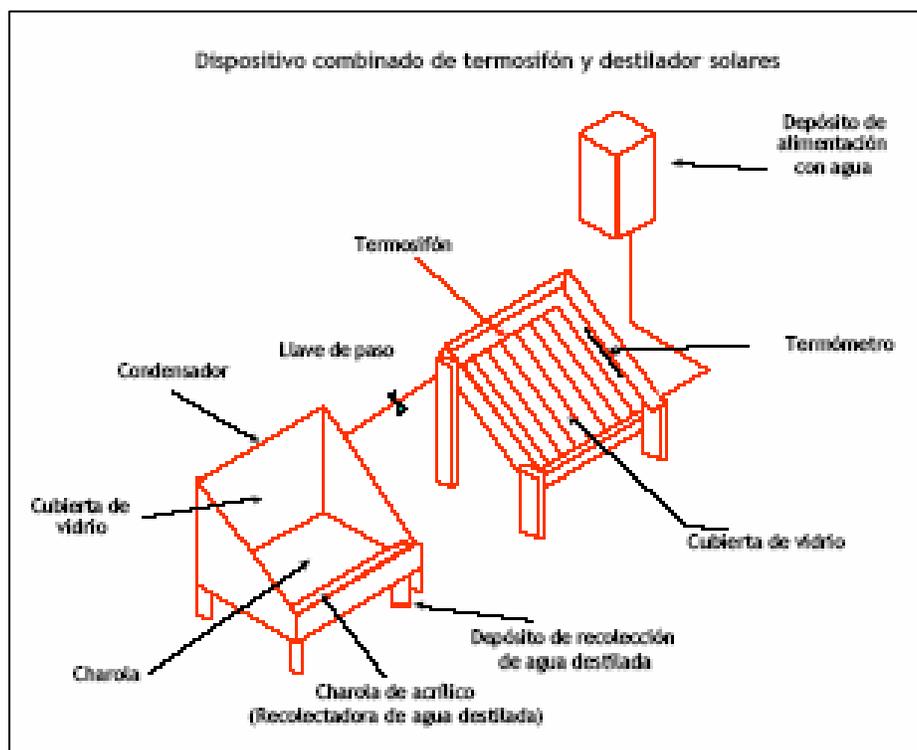
Cuando un calentador solar se utiliza con fines de desinfección, la eficiencia depende directamente de la temperatura que alcance para llevar a cabo el proceso de pasteurización. Dado que el agua alcanza su máxima temperatura entre las 14:30 y las 15:30 horas, se recomienda evitar en lo posible, drenar el tanque antes de esta hora para aumentar así el tiempo de residencia del agua en el equipo. Equipos convencionales familiares pueden producir unos 15 litros y equipos mayores hasta 1 m³ de agua en unas 3-4 horas de operación al mediodía.

Algunos llegan a alcanzar temperaturas del agua de más de 90°C e incluso la vaporizan. No obstante, es necesario evaluar si las condiciones climatológicas del lugar justifican la inversión, de otra manera pueden utilizarse equipos menos eficientes pero también menos costosos.



✓ Dispositivo combinado de termosifón y destilador solar

Está formado por un depósito de alimentación de agua, un termosifón y un condensador y resulta útil en lugares templados donde la temperatura no es suficiente para llevar a cabo el proceso de condensación, entonces el termosifón calienta el agua antes de que pase al condensador.



El termosifón es un gabinete de madera sellado y cubierto con dos vidrios transparentes de 79 x 77 cm separados 2 cm entre sí. El colector está formado por 17 tubos de cobre de 1,5 cm de diámetro que se conectan a dos cabezales de 2,5 cm de diámetro uno inferior de abastecimiento y otro superior de salida. La estructura se apoya en una charola de lámina y todo está pintado en negro mate.

El termosifón se conecta al condensador mediante una tubería de cobre de 1,25 cm y tiene una llave de paso que permite regular el flujo que debe mantenerse a razón de una gota por segundo.

El condensador es un gabinete de madera sellado herméticamente. En su parte frontal tiene un vidrio transparente de 83 x 62 cm con una inclinación de 45°. El agua proveniente del termosifón se colecta en una charola de lámina en la parte inferior del condensador, donde se evapora al elevar su temperatura. El destilado se recoge en una charola de 60 por 13 cm y tiene un orificio en el extremo que drena al depósito de recolección.

Operación del dispositivo: La instalación debe hacerse en un sitio abierto orientando las cubiertas del termosifón el colector hacia el sur. El depósito se llena con 25 L de agua clara, de preferencia previamente filtrada. Se abre la llave de paso y se deja fluir el agua al termosifón hasta la charola del condensador. Se cierra la llave de paso y se espera a que la temperatura en el interior del colector se eleve aproximadamente a unos 70°C. Para esto es útil colocar un termómetro con escala -10 a 110°C. Se abre entonces la llave de paso y dejar fluir el agua del termosifón a la charola del condensador y se regula a un flujo de una gota por segundo en la charola del condensador. Durante la noche, se cierra la llave de paso.

1.3 Ebullición

La ebullición es uno de los métodos más eficaces y accesibles para la desinfección del agua. A pesar de esto, su uso en el medio rural está restringido por la creciente escasez de combustible, principalmente leña. En 1987, el consumo total de leña en el medio rural en México fue de 15.69 millones de toneladas, cuyo uso se destinó principalmente a la preparación de alimentos y al calentamiento del agua como segunda prioridad (SEMIP, 1988). Desde el punto de vista ambiental, se espera que las restricciones en contra del uso de la leña aumenten para prevenir una mayor deforestación, sobre todo en las zonas con problemas agudos de erosión.

Un estudio económico determinó que, a pesar de su efectividad, la ebullición del agua como método normalizado para asegurar la calidad del agua de consumo es una opción económicamente poco factible para la mayoría de las familias rurales en los países en desarrollo.

Es en estos lugares donde es posible recomendar el uso de la energía radiante del sol en el proceso de desinfección. Como se menciona más adelante, existen varios métodos mediante los cuales es posible llevar el agua a punto de ebullición y por lo tanto desinfectarla.

Cualquiera que sea el método que se utilice para hervirla, es necesario que el agua esté de preferencia filtrada para eliminar la mayor cantidad posible de carbón orgánico disponible que puede favorecer la recontaminación. Asimismo, deben observarse las siguientes recomendaciones:

- El agua debe hervirse en un recipiente tapado.
- El agua no debe hervir menos de 5 minutos ni más de 15, contados a partir del inicio de la ebullición vigorosa.
- Debe evitarse la aereación posterior, es decir, la práctica de vaciar el agua de un recipiente a otro varias veces, ya que puede recontaminarse.
- Una vez hervida, el agua debe dejarse enfriar y vaciarse directamente al vaso o recipiente para su consumo. No deben introducirse recipientes dentro del agua hervida.
- El agua hervida debe consumirse dentro de las siguientes 24 h y desechar el sobrante.

2. Desinfección química

2.1 *Dosificador de hipoclorito de sodio*

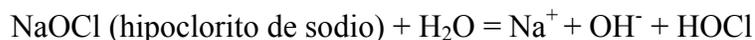
Es un líquido de color amarillento, con un promedio de 15% de cloro activo. En el Perú, el hipoclorito de sodio contiene de 1 a 10%. Se vende en depósitos de plásticos o botellones de vidrio. Su estabilidad depende de las condiciones de almacenamiento, en especial, de su contacto con la luz. Por ser una solución, la estabilidad es menor y puede llegar a los tres meses.

El método más corriente para manufacturar hipoclorito de sodio de grado industrial es burbujeando gas cloro a través de soluciones de soda cáustica. Se obtienen concentraciones del orden del 12% al 14%, este hipoclorito concentrado es también de manejo altamente peligroso y es muy inestable su concentración ya que siendo muy ávido a la oxidación su concentración se pierde rápidamente en función del tiempo. También pierde rápidamente su concentración por la temperatura, luz y material del tanque de almacenamiento. No es raro adquirir un tanque de hipoclorito de 14% de concentración que al llegar a su destino de aplicación ha perdido un 1% y en una semana está a niveles del 10-12%.

Se produce clorando el hidróxido de sodio (soda cáustica) de acuerdo con la siguiente reacción:



En el caso del hipoclorito de sodio, la reacción que tiene lugar es:



La tecnología de los generadores de hipoclorito de sodio *in-situ* es muy sencilla y confiable. Parte del principio de la electrólisis del agua salada o el paso de electricidad entre el ánodo y el cátodo a través del agua salda el cual hace que el H₂O y el ClNa reaccionen y formen el ClONa liberando hidrógeno en su reacción en la parte catódica.

2.2 *Electrolisis “in situ” (producción de hipoclorito de sodio)*

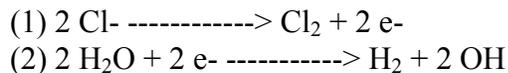
La generación del hipoclorito de sodio en el propio sitio de uso no es nada nuevo. Es un proceso simple que hasta en los últimos 10-15 años con el desarrollo de ánodos especiales de bajo consumo eléctrico, ha hecho que el proceso sea económico y confiable.

La tecnología de los generadores de hipoclorito de sodio *in-situ* es muy sencilla y confiable. Parte del principio de la electrólisis del agua salada o el paso de electricidad entre el ánodo y el cátodo a través del agua salda el cual hace que el H₂O y el ClNa reaccionen y formen el ClONa liberando hidrógeno en su reacción en la parte catódica.

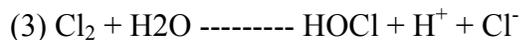
Esta tecnología es prácticamente la misma para la obtención del cloro elemental.

✓ Reacciones en la celda

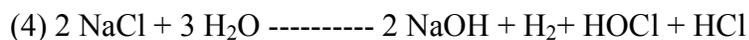
El cloro se genera en el ánodo mientras el cátodo produce hidrógeno así:



Estando aun en la celda, el cloro reacciona inmediatamente y forma ácido hipocloroso de acuerdo a esta reacción:



Considerando que comenzamos con sal (NaCl), todas las reacciones llevan a lo siguiente:



En la misma celda, todo el ácido hipocloroso se disocia y forma el ión hipoclorito el cual se considera como Cloro Libre Disponible o FAC de acuerdo a la siguiente reacción de equilibrio:



Si las concentraciones de HOCl y OCl⁻ son las mismas, la reacción total en la celda es como sigue:



Es bueno hacer notar que cuando se utiliza gas cloro elemental para la desinfección, de los dos átomos de la molécula de cloro (Cl_2) un átomo forma ácido clorhídrico (ClH) el cual se desperdicia ya que no es reactivo oxidante. Y sólo un átomo del Cl_2 es el que forma el ácido hipocloroso (ClOH) siendo este el agente desinfectante. Cuando añaden 100 libras de Cl_2 sólo 50 libras se están utilizando, las otras 50 están siendo desperdiciadas. Acidifica el medio, baja el pH lo cual no es deseable a veces requiriendo neutralización con soda cáustica.

La tecnología actual utiliza ánodos con estructura básica de titanio, que es prácticamente indestructible a la oxidación. Estos ánodos se revisten con óxidos de metales preciosos como iridio, rodio, platino. Este recubrimiento hace que la conductividad eléctrica sea mayor y más uniforme en toda el área de los electrodos causando una mayor eficiencia de producción y menor consumo de electricidad. La electricidad es la materia prima más costosa. El cátodo puede ser de titanio o de aleaciones especiales como Hastelloy-C o de acero inoxidable de alto grado.

Ambas placas forman el corazón del sistema o la celda electrolítica. Estos sistemas generan el hipoclorito de sodio a una concentración del 0,6% al 1,0% (6,000 ppm - 10,000 ppm). Estas concentraciones son amistosas con el medio ambiente y no peligrosas para el operador aunque encierran un alto poder de desinfección. Las soluciones de hipoclorito de sodio a baja concentración, al contrario del gas cloro, son vistas con buenos ojos por los ambientalistas para su uso generalizado en el reemplazo progresivo del uso del gas cloro elemental como alternativa de desinfección. La solución es muy estable debido a que su avidez de oxidación baja notablemente por su relativa baja concentración comparada con el hipoclorito comercial que típicamente se ofrece al 12%.

Los generadores son de construcción sencilla, durables y de muy fácil mantenimiento y operación. Constan de una celda electrolítica y una fuente de poder o paneles fotovoltaicos solares. Los ánodos duran por lo menos tres años siempre que la densidad de corriente aplicada no exceda los límites establecidos para la estabilidad del recubrimiento y por la calidad de la fuente de poder que proporciona la corriente directa. Con el tiempo el recubrimiento se va perdiendo y el consumo eléctrico aumenta paulatinamente hasta que el proceso no resulte económico, teniendo que cambiar el electrodo.

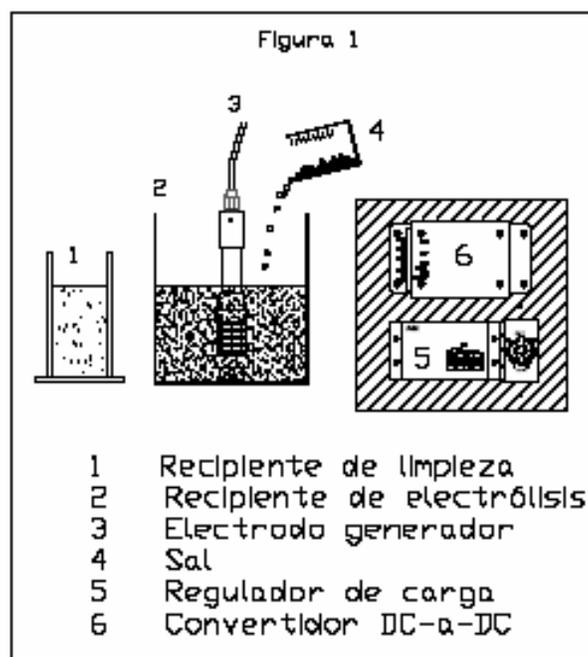
Los sistemas y las nuevas tecnologías han evolucionado notablemente incluyendo fuentes de poder tipo switching, que además de ser pequeñas y livianas comparadas con las convencionales del diseño linear, tienen todo tipo de protecciones para medios de operación tropical, muy resistentes al mal manejo de operadores de baja preparación técnica, protegido contra las fluctuaciones de corriente propias en los países del tercer mundo, con protección de corto circuitos ocasionados por suciedad en el electrolito (hojas, insectos..) etc. Estas fuentes modernas vienen proveídas de temporizadores mecánico/eléctricos que acumulan el tiempo de electrólisis cuando la corriente falla y reanudan la electrólisis cuando la corriente regresa acumulando el tiempo real del proceso electrolítico. Estos sistemas, debido a su relativo bajo consumo eléctrico, operan eficientemente con paneles solares.

El único mantenimiento que se le da al sistema es una inmersión periódica de la celda en vinagre blanco para limpiar la dureza de carbonatos y fosfatos depositados en el cátodo. Es muy importante observar que estos sistemas trabajan por medio de baches, los cuales generan el desinfectante que puede almacenarse y usarse aún en momentos en que no haya energía eléctrica. Esto es muy significativo en áreas rurales en donde el flujo eléctrico falla con frecuencia. La eficiencia y eficacia de la desinfección del agua de las soluciones de hipoclorito de sodio ha sido ampliamente comprobada. Esta proporcionan residuales estables.

Una instalación típica de generación y dosificación simultánea de hipoclorito de sodio in-situ es utilizar tres tanques de polietileno conectados entre sí con un múltiple y con una válvula de paso entre cada uno. En uno de ellos se introduce la celda en la salmuera previamente preparada y se regula el temporizador para determinado tiempo. Se prepara salmuera en un segundo tanque. Al día siguiente se dosifica el hipoclorito generado, a la vez que se introduce el electrodo en el segundo tanque. Se prepara la salmuera en el tercer tanque para el día siguiente y así sucesivamente.

La dosificación de estas soluciones tanto en masas de agua como tanques aéreos, pilas o en líneas presurizados se facilita notablemente debido a su relativo bajo poder corrosivo comparado con el gas cloro y el hipo concentrado pudiendo usarse para su dosificación materiales disponibles en ferreterías comunes no especializadas. Es muy generalizada la dosificación por gravedad mediante válvulas de PVC. La dosificación por medio de bombas químicas de impulso variable es también muy usual en líneas presurizadas o en tanque aéreos siendo esta muy económica y confiable.

Los sistemas se manufacturan en tamaños desde 5 hasta 100 gramos/hora de cloro equivalente en forma de lotes. También se ofrecen sistemas automáticos que generan desde 20 hasta 150 libras/día. Estos sistemas son propios para instalaciones en municipalidades de 100,000 - 200,000 habitantes.



3. Procesos fotoquímicos de desinfección

Tanto la radiación ionizante del tipo ultravioleta (UV) como la radiación electromagnética de la luz visible son capaces de inducir daños a las células y provocar su muerte. El efecto se basa en dañar las moléculas clave en las células como los ácidos nucleicos, ya sea separándolos físicamente de tal forma que se reproduzcan incorrectamente o por reacciones fotoquímicas que conducen a errores en la subsecuente síntesis de proteínas, lo cual significa que el organismo no puede sobrevivir (Hooper, 1987).

El efecto bactericida de la fotodesinfección, es conocido desde hace mucho tiempo. Al principio se pensó que era debido a la acción exclusiva de los rayos UV, pero posteriormente se comprobó que es la combinación de varias longitudes de onda del espectro la que determina dicho efecto.

3.1 Radiación ultravioleta (UV)

Aunque la radiación ultravioleta (o luz ultravioleta o UV) no es popular en el tercer mundo, es el único método físico práctico que puede usarse para la desinfección del agua en comunidades pequeñas (con sistema centralizado de agua). Las aplicaciones prácticas de la radiación ultravioleta comenzaron en 1901 cuando se consiguió producir esta luz artificialmente. Esta técnica se consideró para la desinfección del agua de bebida cuando se comprobó que el cuarzo era uno de los pocos materiales casi totalmente transparente a la radiación ultravioleta, lo que permitió la envoltura protectora de los tubos.

La luz ultravioleta (UV) presenta un método de desinfección alternativo al uso del cloro y el ozono en muchas aplicaciones de tratamiento tanto de agua potable como de aguas residuales. La UV brinda una desinfección efectiva sin generar subproductos de desinfección problemáticos. Este documento presenta información sobre el mecanismo de aplicación de UV para la desinfección del agua potable. Se discuten las ventajas y desventajas de la técnica con miras a su comparación con la desinfección química. Se indica información práctica acerca del diseño de sistemas UV, su operación y mantenimiento, así como los costos de capital, operación y mantenimiento para una gama de estrategias de desinfección.

3.1.1 Propiedades de la radiación ultravioleta

La radiación ultravioleta se caracteriza por longitudes de onda muy cercanas a las de la luz del sol. Los parámetros más importantes de la radiación UV relacionados con la desinfección del agua son:

Longitud de onda: El rango germicida se encuentra entre 240 y 280 nm (nanómetros) y se obtiene la máxima eficiencia desinfectante cerca de los 260 nm. Estos límites se encuentran dentro del rango denominado ultravioleta - C (100-280 nm), que se diferencia del ultravioleta - A (315-400 nm) y del ultravioleta - B (280-315 nm).

Calidad del agua: La temperatura del agua tiene poca o ninguna influencia en la eficacia de la desinfección con luz ultravioleta, pero afecta el rendimiento operativo de la lámpara de luz ultravioleta, cuando la misma está inmersa en el agua. La energía ultravioleta es absorbida por el agua, pero en mucho mayor grado es absorbida por los sólidos en suspensión o disueltos, turbiedad y color. En el agua para consumo humano, la concentración de los sólidos en suspensión es generalmente inferior a 10 ppm, nivel al que empieza a experimentar problemas con la absorción de la luz ultravioleta. La turbiedad debe ser tan baja como sea posible y en todo caso, deben evitarse turbiedades mayores de 5 UTN.

Intensidad de la radiación: A menor distancia del agua respecto al punto de emisión de los rayos, mayor será la intensidad de los mismos y por tanto la desinfección será más eficiente. Con respecto a esta condición, existe una regla general que dice que no debe haber más de 75 mm de profundidad de agua para asegurar que cada porción de la misma sea alcanzada por los rayos adecuadamente.

Tipo de microorganismos: La radiación ultravioleta se mide en microvatios por centímetro cuadrado ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$) y la dosis en microvatios segundo por centímetro cuadrado ($\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$) (radiación x tiempo). La resistencia al efecto de la radiación dependerá del tipo de microorganismo. No obstante, la dosificación de luz ultravioleta requerida para destruir los microorganismos más comunes (coliformes, pseudomonas, etc.) varía entre 6,000 y 10,000 $\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$. Las normas para la dosificación de luz ultravioleta en diferentes países varían entre 16.000 y 38.000 $\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$.

Tiempo de exposición: Como cualquier otro desinfectante, el tiempo de exposición es vital para asegurar un buen desempeño. No es fácil determinar con exactitud el tiempo de contacto (ya que éste depende del tipo de flujo y de las características del equipo), pero el período debería estar relacionado con la dosificación necesaria (recordar la explicación y el concepto del C x T). De cualquier modo, las exposiciones normales son del orden de 10 a 20 segundos.

Para un grado determinado de inactivación de microorganismos, el tiempo requerido de exposición del agua a la luz ultravioleta es inversamente proporcional a la intensidad de la luz que penetra el agua, teniendo en cuenta la capacidad de absorción del agua y la dispersión de la luz debido a la distancia.

El método de desinfección es sencillo, consiste en poner en contacto el flujo de agua con una lámpara ultravioleta, de tal manera que la radiación UV actúe sobre los microorganismos del agua bajo las condiciones arriba expuestas con el consecuente efecto desinfectante.

3.1.2 Mecanismos de la desinfección por radiación ultravioleta

El mecanismo de desinfección se basa en un fenómeno físico por el cual las ondas cortas de la radiación ultravioleta inciden sobre el material genético (ADN) de los microorganismos y los virus, y los destruye en corto tiempo, sin producir cambios físicos o químicos notables en el agua tratada.

Se cree que la inactivación por luz ultravioleta se produce mediante la absorción directa de la energía ultravioleta por el microorganismo y una reacción fotoquímica intracelular resultante que cambia la estructura bioquímica de las moléculas (probablemente en las nucleoproteínas) que son esenciales para la supervivencia del microorganismo. Está demostrado que independientemente de la duración y la intensidad de la dosificación, si se suministra la misma energía total, se obtiene el mismo grado de desinfección.

La mayoría de los equipos de desinfección ultravioleta utilizan una exposición mínima (en el agua) de 30.000 $\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$. Esto es adecuado para inactivar las bacterias y virus patógenos, pero quizá no sea suficiente para ciertos protozoos patógenos, quistes de protozoos y huevos de nemátodos, que pueden requerir hasta 100.000 $\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$ para su inactivación total.

En el cuadro de la página siguiente se muestran valores reportados por varias fuentes de dosis de energía ultravioleta para eliminar algunos micro-organismos. Estos dan una idea del rango y orden de la magnitud de la exposición.

Radiación de energía ultravioleta necesaria para destruir hasta en un 99.99% de los microorganismos patógenos del agua

BACTERIAS	ENERGIA $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	OTROS ORGANISMOS	ENERGIA $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
Bacillus anthracis	8.700		
S. enteritidis	7.600		
B. Megatherium sp. (veg)	2.500	LEVADURA	
B. Megatherium sp. (sporas)	5.200		
B. paratyphosus	6.100	Saccharomyces ellipsoides	13.200
B. subtilis	11.000	Saccharomyces sp.	1.600
B. subtilis spores	22.000	Saccharomyces cerevisiae	13.200
Clostridium tetani	22.000	Levadura para cerveza	660
Cornebacterium diphteriae	6.500	Levadura para panadería	800
Eberthella typosa	4.100	Levadura para repostería	13.200
Escherichia coli	6.600		
Micrococcus candidus	12.300	ESPORAS	
Mycobacterium tuberculosis	10.000		
Neisseria catarrhalis	8.500	Penicillium roqueforti	26.400
Phytomonas tumefaciens	500	Penicillium expansum	22.000
Proteus vulgaris	6.600	Mucor racemosus A	35.200
Pseudomonas aeruginosa	10.500	Mucor racemosus B	5.200
Pseudomonas fluorescens	6.600	Oospora lactis	1.100
S. typhimurium	15.200		
Salmonella	10.000	VIRUS	
Sarcina lutea	26.400		
Serratia marcescens	6.160	Bacteriophage (E. coli)	6.600
Dysentery bacilli	4.200	Virus de la influenza	6.600
Shigella paradysenteriae	3.400	Virus de la hepatitis	8.000
Spirillum rubrum	6.160	Poliovirus (Poliomielitis)	1.000
Staphylococcus alous	5.720	Rotavirus	24.000
Staphylococcus aureus	6.600		
Streptococcus hemolyticus	5.500	ALGAS	
Streptococcus lactis	8.800		
Streptococcus viridans	3.800	Chlorella vulgaris	2.000
Vibrio cholerae	6.500		

3.1.3 Lámparas UV

La luz ultravioleta se produce por medio de lámparas de vapor de mercurio de alta y baja presión, siendo más populares las últimas. Se asemejan a las conocidas lámparas fluorescentes. En realidad, las lámparas ultravioletas son elaboradas por las grandes empresas que fabrican las lámparas fluorescentes estándar. En consecuencia, las lámparas, los balastos y los arrancadores para los sistemas ultravioletas pueden comprarse en tiendas comerciales, salvo las que tengan dimensiones excepcionales.

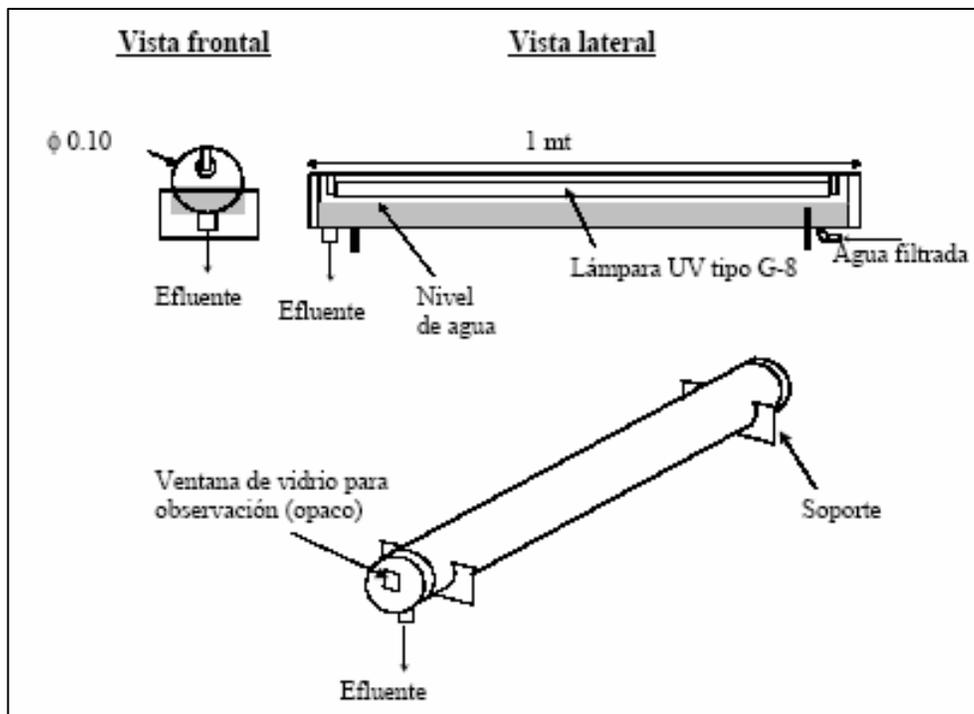
Las lámparas raras veces se queman, pero generalmente se cambian después de que han perdido 25% a 30% de la luz ultravioleta que emitían cuando eran nuevas. Estas lámparas tienen una duración de 10.000 horas, lo que en términos prácticos y teniendo en cuenta el recambio cuando ha descendido su intensidad a 70-75%, significa una vida útil de nueve meses a un año de trabajo sin interrupción.

Como se ha mencionado, la desinfección del agua con luz ultravioleta puede lograrse con longitudes de onda de luz entre 240 y 280 nm y se obtiene la máxima eficiencia germicida a los 260 nm. Las lámparas de arco de mercurio a baja presión que se encuentran en el mercado producen una longitud de onda de luz ultravioleta cerca de 254 nm.

El mecanismo que usa la lámpara ultravioleta es sencillo, dentro de la lámpara, que es un tubo hecho de cuarzo o sílice, un arco eléctrico golpea una mezcla de vapor de mercurio y argón que hay en el interior. Cuando la corriente eléctrica golpea la mezcla, el argón no participa, ya que su función es solo ayudar a arrancar la lámpara, extender la vida del electrodo y reducir las pérdidas, pero las moléculas del mercurio se excitan y cuando los electrones de las órbitas externas descienden a órbitas de menor nivel energético, emiten la energía sobrante en forma de radiación ultravioleta.

Los arrancadores tienen la misión de producir una descarga fuerte que genera la primera ionización del gas. Establecen un cortocircuito sobre la lámpara, que precalienta los electrodos, interrumpe luego bruscamente la corriente, lo que origina en la reactancia inductiva del balasto un pico de alta tensión que inicia el arco. Los balastos fijan la corriente de operación (y por consiguiente la tensión) de la lámpara, presentan una alta impedancia hacia la red en el momento de arranque y producen una resistencia óhmica baja, de manera que las pérdidas de potencia (calor generado) sean mínimas.

En una palabra, el balasto es un elemento que ordena el flujo de electrones dentro del tubo. Es como un policía ordenando el tránsito. Hay dos tipos básicos de cámaras de exposición del agua a la radiación ultravioleta. Aquellas en las que las lámparas están sumergidas en el agua y las que están fuera del agua. En las unidades de luz ultravioleta de lámparas sumergidas, se debe proveer un espacio aislado donde se ubica la lámpara, lo que se logra rodeando la misma con una camisa de cuarzo que es un material transparente a los rayos. Sólo el cuarzo presenta esa característica, y de los plásticos, solo el PTFE (Teflón) es parcialmente transmisible. En el segundo tipo, las lámparas están suspendidas sobre el agua que se está tratando, en forma casi rasante con el agua.



III. Referencias bibliográficas

- Managing water in the home: accelerated health gains from improved water supply Sobsey, Mark D. Geneva; OMS, 2002, vii, 69 p.
- Small community water supplies. Smet, Jo; Wijk, Christine van. Delft; International Water and Sanitation Centre, 2002.
- Desinfección del agua. Felipe Solsona & Juan Pablo Mendez. OPS- CEPIS.
- Water quality and treatment. AWWA - Denver, CO – 1999.
- Water treatment handbook. Degremont. París; Degremont, 1991, 1459 p. 2 v Ilus.tab,
- Water for the World. USAID.
- Methods of water treatment. Technical Note, RWS.3.M.
- Operating and maintaining household treatment systems. Technical Note, RWS.3.O.1.
- Designing basic household water treatment systems. Technical Note, RWS.3.D.1.
- Designing a small community disinfection unit. Technical Note, RWS.3.D.4.
- Water treatment in emergencies. Technical Note, RWS.3.D.5.

- Inorganic Arsenic Removal by zero-valent Iron. Jeffrey A. Lockovic & Nikolaos P. Nikolaidis. Environmental Engineering Science – Vol 17.
- Appraisal of a Simple Arsenic Removal Method for groundwater of Bangladesh. A.H. Khon & S.B.Rasal. J. Environ, Sci. Health 1021-1041 (2000).
- Solar Disinfection of drinking water. For the IISD Sustainable development research competition / April 8 – 2004.

✓ **Referencias**

- http://www.cdc.gov/spanish/agua-segura/s-alt_water.htm
- http://www.who.int/water_sanitation_health/en
- http://www.who.int/household_water