

CAPÍTULO 1

ASPECTOS FISICOQUÍMICOS DE LA CALIDAD DEL AGUA

Quím. Ada Barrenechea Martel

1. INTRODUCCIÓN

1.1 El agua: un 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 solo 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.

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 o irreversible.

1.2 Las fuentes de agua de origen superficial

Debido a que las principales fuentes de agua para el tratamiento con fines de consumo humano son de origen superficial, en el presente manual se tratarán los temas específicamente relacionados con este tipo de agua.

En la sección anterior, destacamos la importancia que tiene el agua como solvente universal y señalamos que, debido a esta propiedad, es capaz de transportar casi la totalidad de sustancias que encuentra a su paso.

Por otro lado, la contaminación de los recursos hídricos superficiales es un problema cada vez más grave, debido a que se 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.

1.3 Aspectos fisicoquímicos

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.

Algunos procesos fisicoquímicos que ocurren en el agua pueden ser evaluados si se recurre a los principios de equilibrio químico, incluida la Ley de Acción de Masas y la Ecuación de Nerst o al conocimiento de los mecanismos de reacción y de las proporciones para los procesos irreversibles.

2. CALIDAD DEL AGUA

El término *calidad del agua* es relativo y solo 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.

Es importante anotar que la evaluación de la calidad del agua se realiza usando técnicas analíticas adecuadas para cada caso. Para que los resultados de estas determinaciones sean representativos, es necesario dar mucha importancia a los procesos de muestreo y a las unidades y terminología empleadas.

Para una correcta interpretación de los datos obtenidos, los resultados de los análisis deben manejarse estadísticamente, teniendo en cuenta la correlación de iones, los factores que gobiernan el comportamiento de los componentes del agua, etcétera. El uso de gráficos ayuda a mostrar las relaciones físicas y químicas entre el agua, las fuentes probables de contaminación o polución y el régimen de calidad y, por tanto, a realizar adecuadamente la evaluación de los recursos hídricos.

A continuación se tratan en detalle las principales características fisicoquímicas y biológicas que definen la calidad del agua, el origen de los constituyentes, su importancia en la salud, su relación con los principales procesos de tratamiento y los límites de concentración establecidos por las normas internacionales de calidad de agua para consumo humano.

2.1 Características físicas

Las características físicas del agua, llamadas así porque pueden impresionar a los sentidos (vista, olfato, etcétera), tienen directa incidencia sobre las condiciones estéticas y de aceptabilidad del agua.

Se consideran importantes las siguientes:

- turbiedad;
- sólidos solubles e insolubles;
- color;
- olor y sabor;
- temperatura, y
- pH.

2.1.1 Turbiedad

La turbiedad es originada por las partículas en suspensión o coloides (arcillas, limo, tierra finamente dividida, etcétera). 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, etcétera.

El diseño de los sistemas de remoción de turbiedad debe considerar no solo 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 (1), 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.

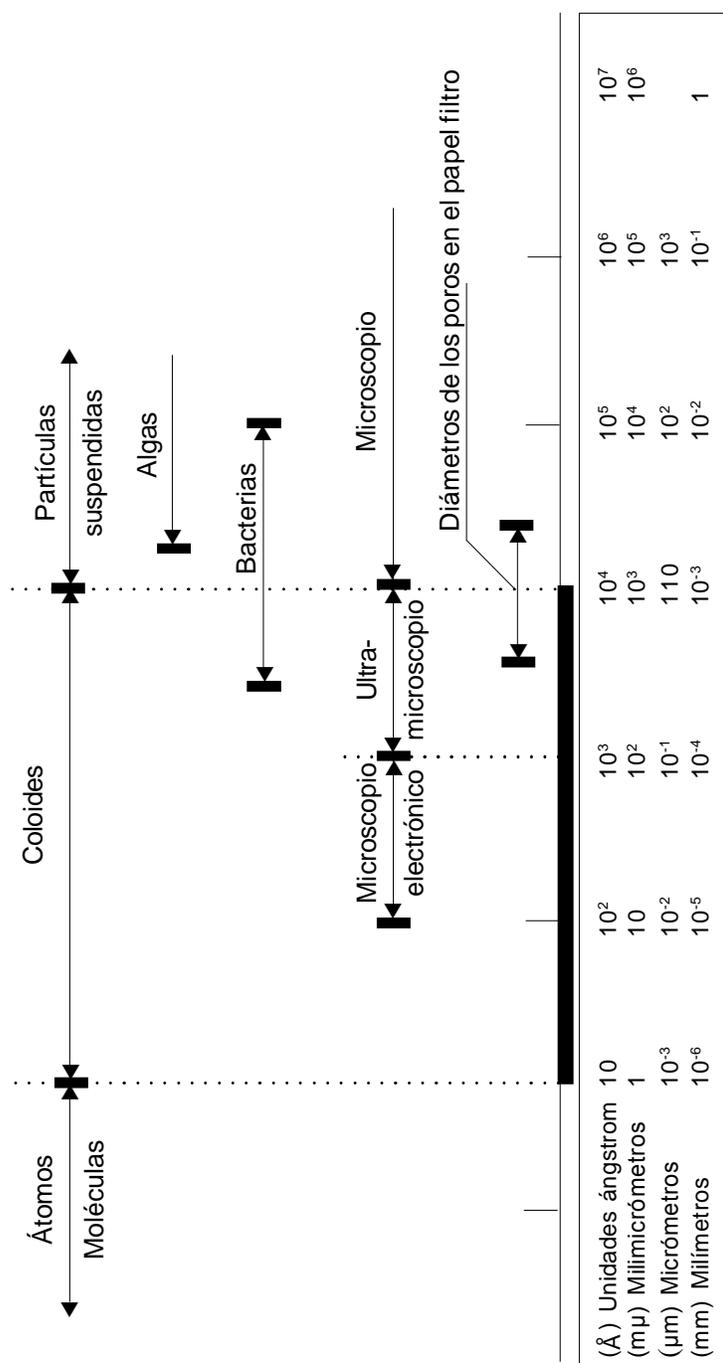


Figura 1-1. Distribución de tamaños de las partículas en el agua

2.1.2 Sólidos y residuos

Se denomina así a los residuos que se obtienen como materia remanente luego de evaporar y secar una muestra de agua a una temperatura dada.

Según el tipo de asociación con el agua, los sólidos pueden encontrarse suspendidos o disueltos.

La figura 1-1 muestra la distribución de partículas en el agua según su tamaño. Las partículas pueden estar:

- Disueltas (hasta un milimicrómetro), en cuyo caso físicamente no influirán en la turbiedad, pero sí podrían definir su color u olor.
- Formando sistemas coloidales (1 a 1.000 milimicrómetros), que son las causantes de la turbiedad neta del agua.
- En forma de partículas suspendidas (por encima de 1.000 milimicrómetros), las cuales caen rápidamente cuando el agua se somete a reposo.
- Es necesario aclarar que las pruebas analíticas para determinar las formas de los residuos no determinan sustancias químicas específicas y solo clasifican sustancias que tienen propiedades físicas similares y comportamiento semejante frente a las diferentes condiciones ambientales.

Sólidos totales. Corresponden al residuo remanente después de secar una muestra de agua. Equivalen a la suma del residuo disuelto y suspendido. El residuo total del agua se determina a 103–105 °C.

Equivalencias:

Sólidos totales = sólidos suspendidos + sólidos disueltos

Sólidos totales = sólidos fijos + sólidos volátiles

Sólidos disueltos o residuos disueltos. Mejor conocidos como *sólidos filtrables*, son los que se obtienen después de la evaporación de una muestra previamente filtrada.

Comprenden sólidos en solución verdadera y sólidos en estado coloidal, no retenidos en la filtración, ambos con partículas inferiores a un micrómetro (1 μ).

Sólidos en suspensión. Corresponden a los sólidos presentes en un agua residual, exceptuados los solubles y los sólidos en fino estado coloidal. Se considera que los sólidos en suspensión son los que tienen partículas superiores a un micrómetro y que son retenidos mediante una filtración en el análisis de laboratorio.

Sólidos volátiles y fijos. Los sólidos volátiles son aquellos que se pierden por calcinación a 550 °C, mientras que el material remanente se define como sólidos fijos.

La mayor parte de los sólidos volátiles corresponden a material orgánico. Los sólidos fijos corresponden, más bien, a material inorgánico.

2.1.3 Color

Esta característica del agua puede estar ligada a la turbiedad o presentarse independientemente de ella.

Aún no es posible establecer las estructuras químicas fundamentales de las especies responsables del color. Esta característica del agua se atribuye comúnmente a la presencia de taninos, lignina, ácidos húmicos, ácidos grasos, ácidos fúlvicos, etcétera. Se considera que el color natural del agua, excluyendo el que resulta de descargas industriales, puede originarse por las siguientes causas:

- la extracción acuosa de sustancias de origen vegetal;
- la descomposición de la materia;
- la materia orgánica del suelo;
- la presencia de hierro, manganeso y otros compuestos metálicos; y
- una combinación de los procesos descritos.

En la formación del color en el agua intervienen, entre otros factores, el pH, la temperatura, el tiempo de contacto, la materia disponible y la solubilidad de los compuestos coloreados.

Se denomina color aparente a aquel que presenta el agua cruda o natural y color verdadero al que queda luego de que el agua ha sido filtrada.

Existen muchos métodos de remoción del color. Los principales son la coagulación por compuestos químicos como el alumbre y el sulfato férrico a pH bajos y las unidades de contacto o filtración ascendente.

Debido a que el color del agua se origina, en muchos casos, por la presencia de compuestos de naturaleza orgánica, se recomienda que la desinfección se realice luego de que este haya sido removido, para evitar que la aplicación de cloro como desinfectante pueda dar origen a la formación de trihalometanos, compuestos que tienen efecto cancerígeno en animales.

El valor guía de la OMS y del Canadá es 15 unidades de color (UC) para aguas de bebida.

2.1.4 Olor y sabor

El sabor y el olor están estrechamente relacionados; por eso es común decir que “A lo que huele, sabe el agua”.

Estas características constituyen el motivo principal de rechazo por parte del consumidor.

En términos prácticos, la falta de olor puede ser un indicio indirecto de la ausencia de contaminantes, tales como los compuestos fenólicos. Por otra parte, la presencia de olor a sulfuro de hidrógeno puede indicar una acción séptica de compuestos orgánicos en el agua.

El cuadro 1-1 presenta un resumen de algunos olores característicos del agua, de acuerdo con su origen.

Cuadro 1-1. Olores característicos del agua y su origen

Naturaleza	Origen
Olor balsámico	Flores
Dulzor	<i>Coelosphaerium</i>
Olor químico	Aguas residuales industriales
Olor a cloro	Cloro libre
Olor a hidrocarburo	Refinería de petróleo
Olor medicamentoso	Fenol, yodoformo
Olor a azufre	Ácido sulfhídrico, H ₂ S
Olor a pescado	Pescado, mariscos
Olor séptico	Alcantarilla
Olor a tierra	Arcillas húmedas
Olor fecaloide	Retrete, alcantarilla
Olor a moho	Cueva húmeda
Olor a legumbres	Hierbas, hojas en descomposición

Las sustancias generadoras de olor y sabor en aguas crudas pueden ser compuestos orgánicos derivados de la actividad de microorganismos y algas o provenir de descargas de desechos industriales.

En el agua se pueden considerar cuatro sabores básicos: ácido, salado, dulce y amargo.

El cuadro 1-2 muestra los límites de percepción de algunas sales y compuestos presentes en el agua.

Cuadro 1-2. Límites de percepción de algunas sales y compuestos en el agua (mg/L)

Sustancia	Netamente reconocible	Debidamente perceptible	No apreciable
CaCl ₂ ; NaCl	600	300	150
MgCl ₂	100	60	—
FeSO ₄	—	3,5	1,75
CuSO ₄	7	3,5	1,75
H ₂ S	1,15	0,55	0,30
H ₂ SO ₄	4	2	1
Cl ₂	0,1	0,05	0,05
Ca(OCl) ₂	0,5	0,20	0,20

En algunos casos, la eliminación de los olores puede realizarse mediante la aereación o la adición de carbón activado.

La cloración en presencia de compuestos fenólicos puede imprimir un mal sabor en el agua, por la formación de derivados clorados que producen un sabor a derivados fenólicos.

La EPA y la OMS recomiendan como criterio que por razones organolépticas, las fuentes de abastecimiento deben estar razonablemente exentas de olor y sabor; es decir, en términos generales, que se encuentren en un nivel aceptable.

2.1.5 Temperatura

Es uno de los parámetros físicos más importantes en el agua, pues por lo general influye en el retardo o aceleración de la actividad biológica, la absorción de oxígeno, la precipitación de compuestos, la formación de depósitos, la desinfección y los procesos de mezcla, floculación, sedimentación y filtración.

Múltiples factores, principalmente ambientales, pueden hacer que la temperatura del agua varíe continuamente.

2.1.6 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.

Cuando se tratan aguas ácidas, es común la adición de un álcali (por lo general, cal) para optimizar los procesos de coagulación. En algunos casos, se requerirá volver a ajustar el pH del agua tratada hasta un valor que no le confiera efectos corrosivos ni incrustantes.

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.

2.2 Características químicas

El agua, como solvente universal, puede contener cualquier elemento de la tabla periódica. Sin embargo, pocos son los elementos significativos para el tratamiento del agua cruda con fines de consumo o los que tienen efectos en la salud del consumidor.

Cuadro 1-3. 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, 1996 (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 ^b
Inorgánicos				
Aluminio	mg/L	—	—	0,2
Amonio	mg/L	—	—	1,5
Antimonio	mg/L	0,006	—	0,005 ^(p)
Arsénico	mg/L	0,05	0,05	0,01 ^c
Bario	mg/L	2,0	1,0	0,7
Boro	mg/L	—	5,0	0,3
Cadmio	mg/L	0,005	0,005	0,003
Cianuro	mg/L	0,2	0,2	0,07
Cinc	mg/L	—	5,0	3
Cloro	mg/L	—	—	5 ^d
Cloruro	mg/L	—	250	250
Cobre	mg/L	1,3 ^{na}	1,0	2 ^d
Cromo (total)	mg/L	0,1	0,05	0,05 ^(p)
Fluoruro	mg/L	4	1,5	1,5
Hierro	mg/L	—	0,3	0,3
Manganeso	mg/L	—	0,05	0,5 ^(p)
Mercurio	mg/L	0,002	0,001	0,001
Nitrato (como N)	mg/L	10	10 } ^f	50 } ^j
Nitrito (como N)	mg/L	1	1,0 } ^f	3 } ^j
pH	—	—	6,5 – 8,5	—
Plata	mg/L	—	0,05	(i)
Plomo	mg/L	0,015 ^{na}	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 ^o
Sólidos disueltos	mg/L	—	500	1.000

Parámetros		Regulaciones Internas Primarias EPA (2000)	Guías de Calidad para el Agua de Bebida del Canadá-1978 (2)	Guidelines for Drinking-Water Quality OMS, 1996 (3)
Orgánicos	Unidades $\mu\text{g/L}$	Nivel máximo permitido	Concentración máxima aceptable	Valor guía
Aldrín + dieldrín	$\mu\text{g/L}$		0,7	0,03
Benceno	$\mu\text{g/L}$	5	—	10 ^c
Carbofurano	$\mu\text{g/L}$	40	—	5
Clordano	$\mu\text{g/L}$	2	7	0,2
Clorobenceno	$\mu\text{g/L}$	100	—	—
Cloroformo	$\mu\text{g/L}$	—	100	200 ^c
DDT	$\mu\text{g/L}$	—	30	2
Dioxina	$\mu\text{g/L}$	0,00003	—	—
Endrín	$\mu\text{g/L}$	2	0,2	—
Fenoles	$\mu\text{g/L}$	—	2	—
Heptacloro + heptaclor-epóxido	$\mu\text{g/L}$	0,6	3	0,03
Lindano	$\mu\text{g/L}$	0,2	4	2
Metoxycloro	$\mu\text{g/L}$	40	100	20
Monocloramina	$\mu\text{g/L}$	—	—	3.000
Parathión	$\mu\text{g/L}$	—	35	—
PCB	$\mu\text{g/L}$	0,5	—	—
Plaguicidas (total)	$\mu\text{g/L}$	—	100 ^h	—
Tetracloruro de carbono	$\mu\text{g/L}$	5	—	2
Tolueno	$\mu\text{g/L}$	1.000	—	700 ^d
Toxafeno	$\mu\text{g/L}$	3	5	—
2,4-D	$\mu\text{g/L}$	70	100	30
2,4,5-TP	$\mu\text{g/L}$	50	10	9
Trihalometanos	$\mu\text{g/L}$	100	350	^f

TCU: Unidades de Color Verdadero.

UNT: Unidades Nefelométricas de Turbiedad.

^(p) Valor guía provisional.

⁽¹⁾ En las concentraciones normalmente encontradas, no se ha detectado daño en la salud.

^a 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 límite, 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.

^b Turbiedad promedio para una efectiva desinfección: = 1 UNT. Muestra simple: = 5 UNT.

^c Por ser consideradas sustancias cancerígenas.

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

^e Cuando nitrato y nitrito 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.

[®] Relacionado con el olor y el sabor del agua.

^{na} 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.

A continuación se sustentan las características e importancia de los principales parámetros químicos relacionados con las fuentes de abastecimiento. Asimismo, se citan las recomendaciones que, como criterios de calidad, ha publicado la EPA en el año 2000 (4) en Estados Unidos, así como las Guías de Calidad para Agua de Bebida del Canadá-1978 y las Guías de Calidad para Aguas de Consumo Humano de la OMS (3). Véase el cuadro 1-3.

2.2.1 Aceites y grasas

La presencia de aceites y grasas en el agua puede alterar su calidad estética (olor, sabor y apariencia).

El contenido de aceites y grasas en el agua se determina en el laboratorio mediante la extracción de todo el material soluble en un solvente orgánico tal como el hexano. Los resultados se reportan como mg/L de MEH (material extraíble en hexano).

Las normas de calidad de agua recomiendan que los aceites y grasas estén ausentes en el agua para consumo humano, más por razones de aceptabilidad que porque exista algún riesgo de daño a la salud.

2.2.2 Agentes espumantes

Entre los agentes espumantes se agrupa a todos los compuestos tensoactivos que, por su naturaleza, en mayor o en menor grado, producen espuma cuando el agua es agitada. La causa principal reside en la presencia de residuos de los detergentes domésticos, como el alquil-sulfonato lineal (LAS) y el alquil-sulfonato bencénico ramificado (ABS), entre los más comunes.

Su acción más importante en las aguas superficiales está relacionada con la interferencia en el poder autodepurador de los recursos hídricos, debido a la inhibición de la oxidación química y biológica. Como consecuencia de esto, aun en aguas fuertemente contaminadas, la determinación de la carga orgánica biodegradable (DBO) suele presentar valores bajos. Esto se debe, entre otras causas, a que las bacterias en presencia de detergentes se rodean de una película que las aísla del medio e impide su acción.

Por otro lado, la solubilidad del oxígeno en aguas que contienen detergentes es menor que en aguas libres de ellos. Se disminuye, en consecuencia, la difusión del oxígeno del aire a través de la superficie del agua.

Frente a la presencia de aceites y grasas, los detergentes juegan un papel emulsionante, lo que depende fundamentalmente de la estructura del grupo liófilo del detergente.

Asimismo, los “agentes tensoactivos” presentes en el agua pueden dispersar las sustancias insolubles o absorbidas, debido a la disminución de la tensión superficial del agua. Interfieren así en los procesos de coagulación, sedimentación y filtración.

Aunque los detergentes pueden tener estructuras químicas diversas o ser más o menos biodegradables, se ha demostrado que concentraciones menores de 0,5 mg/L no tienen efectos adversos en los procesos de tratamiento ni en la salud.

Las Guías de Calidad para Aguas de Consumo Humano no presentan un valor guía referido al contenido de detergentes en el agua de bebida, pero recomiendan que el agua no presente espuma ni problemas de olor ni sabor relacionados con este parámetro.

2.2.3 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.

2.2.4 Aluminio

Es un componente natural del agua, debido principalmente a que forma parte de la estructura de las arcillas. Puede estar presente en sus formas solubles o en sistemas coloidales, responsables de la turbiedad del agua. Las concentraciones más frecuentes en las aguas superficiales oscilan entre 0,1 y 10 ppm.

El problema mayor lo constituyen las aguas que presentan concentraciones altas de aluminio, las cuales confieren al agua un pH bajo, debido a sus propiedades anfóteras, que hacen que sus sales se hidrolicen formando ácidos débiles.

Durante el tratamiento es posible remover las sales de aluminio solubles, mediante la formación de hidróxido de aluminio. Sin embargo, es necesario tener mucho control del pH, pues si este sube excesivamente, podría producirse la formación de aluminatos, nuevamente solubles. La coagulación, en este caso, se realiza mediante polímeros orgánicos, por lo general aniónicos.

Cuando el aluminio se encuentra en el agua cruda, se recomienda usar como coagulantes sales de hierro o polímeros sintéticos. Los coagulantes aluminicos dejan un remanente de metal que, en algunos casos, puede llegar a niveles no deseados.

En el caso del aluminio, la OMS ha establecido un valor guía de 0,2 mg/L para aguas de consumo humano.

2.2.5 Amonio

Es el producto final de la reducción de las sustancias orgánicas e inorgánicas nitrogenadas y debe su origen a los siguientes factores:

- El nitrógeno atmosférico, por fijación química.

- Las proteínas animales o vegetales, por putrefacción mediante acción bacteriana.
- La reducción de nitritos.

El amoníaco se encuentra en cantidades notables cuando el medio es fuertemente reductor. En un medio oxidante, el ion amonio se transforma en nitrito.

Se le considera un constituyente normal de las aguas superficiales y está íntimamente relacionado con descargas recientes de desagües. Cuando su concentración es mayor de 0,1 mg/L (como N), podría constituirse en un indicador de contaminación por aguas residuales domésticas o industriales.

El amoníaco en las aguas residuales es producido en su mayor parte por la eliminación de compuestos que tienen nitrógeno orgánico y por la hidrólisis de la urea o úrea. En casos menos frecuentes, se puede producir por reducción de nitratos en condiciones anaeróbicas.

El amoníaco es un micronutriente para microorganismos y algas en los sistemas de distribución. Su presencia en el agua favorece la multiplicación de estos.

Este compuesto influye en los procesos de desinfección con cloro e incrementa su demanda debido a la formación de cloramidas.

Por lo general, la eliminación del amoníaco a concentraciones altas se realiza mediante la oxidación con cloro.

La OMS establece como valor guía para aguas de bebida 1,5 mg/L, referido más bien a criterios de aceptabilidad (olor y sabor).

2.2.6 Antimonio

No es un elemento esencial para la vida de las personas o animales. En el agua puede encontrarse bajo el estado de oxidación III ó V y a concentraciones promedio de 0,6 mg/L. Se lo relaciona con el aumento del colesterol en la sangre.

Las principales fuentes de contaminación de las aguas superficiales con antimonio son las descargas de la industria petrolera, cerámica, electrónica, entre otras.

Debido a que su comportamiento químico es parecido al del arsénico, su proceso de remoción es similar al de este.

Respecto al agua potable, el valor guía provisional dado por la OMS es de 0,005 mg/L. La EPA indica como nivel máximo de concentración 0,006 mg/L.

2.2.7 Arsénico

Puede estar presente en el agua en forma natural. Es un elemento muy tóxico para el hombre.

Se encuentra en forma trivalente o pentavalente, tanto en compuestos inorgánicos como orgánicos.

Las concentraciones de As en aguas naturales usualmente son menores de 10 µg/L. Sin embargo, en zonas mineras pueden encontrarse concentraciones entre 0,2 y 1 g/L.

La toxicidad del As es compleja, pues depende de la vía de exposición, del estado de valencia y de la forma química (inorgánica u orgánica) del compuesto. El arsénico inorgánico es el responsable de la mayoría de los casos de intoxicación en seres humanos.

En cuanto a las especies oxidadas, generalmente las sales inorgánicas de As(III) son más tóxicas que las de As(V) y la solubilidad de los compuestos de arsénico inorgánico está relacionada con su toxicidad; todos los compuestos solubles son tóxicos.

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 (5) en la Argentina.

El metabolismo del As se realiza principalmente en el hígado, aunque su mecanismo no está bien establecido.

La remoción de arsénico del agua se basa principalmente en su oxidación a su forma pentavalente antes de la coagulación con sulfato férrico a pH de 6 a 8,

con alumbre a pH de 6 a 7 o ablandamiento con cal a pH 11. A escala experimental, este método ha permitido una remoción de 90% de arsénico.

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.

2.2.8 Asbesto

El contenido de asbesto en el agua es una preocupación reciente. Bajo ciertas condiciones de calidad del agua y debido a la erosión, las fibras de asbesto pueden desprenderse de las tuberías de asbesto-cemento presentes en los sistemas de distribución. Sin embargo, una vez identificado el problema, es posible mitigar el efecto mediante el control y la reducción de la corrosividad del agua.

Estudios realizados en el Canadá encontraron cantidades que varían desde menos de 105 hasta 2×10^9 fibras de asbesto por litro en agua cruda y cantidades de $9,5 \times 10^6$ fibras de asbesto por litro en el agua filtrada (6).

La EPA reporta que concentraciones superiores a 7 millones de fibras mayores de 10 micrómetros por litro (nivel máximo permitido) en el agua potable podrían significar un alto riesgo de desarrollar pólipos intestinales benignos.

Sin embargo, la OMS considera que no es necesario recomendar un valor guía para el asbesto en el agua de bebida, debido a que las concentraciones normalmente halladas en ella no representan un riesgo para la salud.

2.2.9 Bario

Elemento altamente tóxico para el hombre; causa trastornos cardíacos, vasculares y nerviosos (aumento de presión arterial). Se considera fatal una dosis de 0,8 a 0,9 gramos como cloruro de bario (de 550 a 600 miligramos de bario).

La contaminación del agua por bario puede provenir principalmente de los residuos de perforaciones, de efluentes de refinerías metálicas o de la erosión de depósitos naturales.

Las concentraciones halladas en el agua son por lo general muy bajas; varían entre trazas y 0,05 mg/L.

Estudios realizados en las aguas de consumo muestran evidencias de que el bario puede ser absorbido por óxidos e hidróxidos de hierro y manganeso, lo cual explicaría su eliminación durante la coagulación. Sin embargo, existen pruebas que demuestran que el tratamiento convencional mediante coagulantes de aluminio y hierro, con filtración posterior, no es un método particularmente efectivo para la remoción de bario en el agua. Sorg y Logsdon (7) encontraron una eficiencia menor de 30% en pruebas de laboratorio.

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 (7, 8).

Como un margen de seguridad, la EPA y las Guías de Calidad para Agua de Bebida del Canadá han fijado tentativamente como límite 2 y 1 mg/L, respectivamente, en las fuentes de aguas de consumo humano. La OMS da un valor guía de 0,7 mg/L.

2.2.10 Boro

El boro no se considera un elemento esencial para la nutrición humana. Existen estudios que demuestran su influencia en el retardo del crecimiento de las plantas.

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.

La OMS ha establecido como valor guía para aguas de consumo 0,3 mg/L, mientras que el Canadá considera 5 mg/L como concentración máxima aceptable. Esta diferencia tan grande entre los valores guía se debe a la insuficiente información sobre los efectos de esta sustancia sobre el bienestar del consumidor.

2.2.11 Cadmio

No es un elemento esencial para la vida del hombre.

La contaminación de las aguas superficiales con este metal pesado puede provenir de la corrosión de los tubos galvanizados, de la erosión de depósitos

naturales, de los efluentes de refinерías de metales o de líquidos de escorrentía de baterías usadas o pinturas. Muchos pigmentos usados para la coloración de plásticos o la formulación de pinturas contienen concentraciones elevadas de cadmio.

Este metal pesado es potencialmente tóxico y su ingestión tiene efectos acumulativos en el tejido del hígado y los riñones.

En el organismo, algunos iones Ca^{2+} de los huesos pueden ser reemplazados por iones Cd^{2+} , pues ambos iones tienen el mismo estado de oxidación y casi el mismo tamaño. Esta sustitución puede causar fragilidad en los huesos y susceptibilidad a las fracturas.

La ingestión de agua y alimentos que contengan el metal representa de 5 a 10% del total de cadmio absorbido en el organismo. Estas concentraciones dependen de la ingestión de proteínas y de la presencia de vitamina D; incluso, se relaciona con la concentración en el organismo de algunos elementos, como Zn, Se y Ca, con los cuales compite el cadmio. El cadmio también reduce los niveles de hierro hepático.

La vida media del cadmio en el organismo es muy larga y se calcula entre 10 y 30 años, periodo en el cual permanece almacenado en varios órganos, en particular el hígado y los riñones.

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 (9).

El sulfato de hierro puede remover 90% de cadmio a pH 7,5 (10).

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

La EPA recomienda como margen de seguridad un límite máximo permisible de 0,005 mg/L para aguas de consumo humano. Los valores guía dados por la OMS y el Canadá son 0,003 mg/L y 0,005 mg/L, respectivamente. Sin embargo, dado el poder bioacumulativo del cadmio, se recomienda que la concentración en el agua tratada sea la menor posible.

2.2.12 Cianuro

Su presencia no es frecuente en aguas naturales.

La concentración de cianuro en aguas superficiales se debe, por lo general, a su contaminación mediante descargas industriales, en especial de galvanoplastia, plásticos, fertilizantes y minería. La extracción de oro usa cantidades importantes de cianuro en procesos que generan efluentes con estos residuos, la mayor parte de los cuales tienen como destino final los ríos y los lagos.

El cianuro es muy tóxico: una dosis de 0,1 mg/L tiene efectos negativos en los peces y una de 50–60 mg/L puede ser fatal para los seres humanos. Los efectos del cianuro sobre la salud están relacionados con lesiones en el sistema nervioso y problemas de tiroides.

La toxicidad del cianuro depende de su concentración, el pH y la temperatura, entre otros factores. Los cianuros alcalinos disueltos se transforman por oxidación en carbonatos alcalinos, lo cual hace que disminuyan extraordinariamente sus propiedades tóxicas.

El organismo humano convierte el cianuro en tiocianato, sustancia de menor toxicidad y de fácil excreción.

Es importante anotar que la flora bacteriana no muere, sino que se inhibe con la presencia de pequeñas concentraciones de cianuro, y vuelve a desarrollar su actividad normal cuando desaparece.

Cuando un agua que contiene cianuros o sulfocianuros se clora, se forma cloruro de cianógeno (CICN), muy tóxico, que persiste durante 24 horas a pH 9 si no hay cloro residual.

Bajo condiciones ácidas, la ozonización o cloración de aguas contaminadas con tiocianato puede favorecer la formación de ácido cianhídrico (HCN).

En la cloración con cloro gas o hipoclorito, el cianuro libre (HCN y CN⁻) se destruye y se transforma en cianato (11, 12). La cloración efectuada hasta obtener cloro residual, a pH neutro o ligeramente alcalino, reduce los niveles de cianuro por debajo de los límites propuestos como deletéreos.

El ozono es también particularmente efectivo para la oxidación del cianuro.

Hay poca información reciente sobre la remoción de cianuro durante el tratamiento del agua con fines de consumo, tal vez porque debería estar ausente en el agua cruda seleccionada para su potabilización.

La EPA y las Guías de Calidad para Agua de Bebida del Canadá recomiendan un contenido no mayor de 0,2 mg/L en aguas destinadas a consumo público. La OMS propone una concentración menor: 0,07 mg/L.

2.2.13 Cinc

Las aguas naturales pueden contener cinc en concentraciones bastante bajas. En el agua de suministro, el cinc proviene generalmente del contacto con accesorios y estructuras galvanizadas o de bronce.

El cinc es un elemento esencial y benéfico para el metabolismo humano, ya que muchas enzimas dependen de él para la descomposición del ácido carbónico y de la insulina, hormona esencial en el metabolismo de los hidratos de carbono.

La salubridad del cinc es variable y depende del pH y de la alcalinidad.

Diferentes estudios han demostrado que el cinc no tiene efectos sobre la salud en concentraciones tan altas como 40 mg/L, pero que tiene un marcado efecto sobre el sabor; por ello su contenido debe limitarse.

Por ser un elemento anfótero, el cinc puede estar en sus formas solubles tanto con pH ácido como alcalino. Debido a esto, su remoción es difícil, aunque hay poca información al respecto.

Estudios de remoción de cinc en aguas residuales reportan que la coagulación con sulfato no es efectiva (30%). El ablandamiento cal-soda con un pH de 9,5 puede mejorar la eficiencia hasta un rango de 60 a 90% (10).

Debido a su influencia en el sabor y a la poca información respecto a su remoción, las Guías de Calidad para Agua de Bebida del Canadá recomiendan que la concentración de cinc en aguas de consumo no exceda los 5 mg/L. La OMS limita esta recomendación a 3 mg/L.

2.2.14 Cloruros

Las aguas superficiales normalmente no contienen cloruros en concentraciones tan altas como para afectar el sabor, excepto en aquellas fuentes provenientes de terrenos salinos o de acuíferos con influencia de corrientes marinas.

En las aguas superficiales por lo general no son los cloruros sino los sulfatos y los carbonatos los principales responsables de la salinidad.

A partir de ciertas concentraciones, los cloruros pueden ejercer una acción disolvente sobre ciertas sales presentes en el agua y también sobre algunos componentes del cemento, al impartirles una acción corrosiva y erosionante, en especial a pH bajo.

Por sus características químicas y la gran solubilidad de la mayoría de los cloruros, su remoción requiere métodos sofisticados y costosos, muchos de ellos impracticables, especialmente cuando se trata de volúmenes relativamente altos. El método tradicional, que puede resultar más eficiente y práctico, es el de la destilación. Actualmente se está trabajando en este campo para lograr unidades que aprovechen la energía solar y eliminen los cloruros de manera eficiente y a bajo costo. Este sistema puede resultar especialmente útil en comunidades costeras cuya única fuente sea el agua del mar.

Los límites fijados en el agua por las normas de calidad se sustentan más en el gusto que le imparten al agua que en motivos de salubridad.

Tomando en cuenta el límite de percepción del sabor de los cloruros en el agua (cuadro 1-3), se ha establecido un límite de 250 mg/L en aguas de consumo, concentración que puede ser razonablemente excedida según las condiciones locales y la costumbre de los consumidores. La OMS considera que por encima de esta concentración, los cloruros pueden influir en la corrosividad del agua.

2.2.15 Cobre

Con frecuencia se encuentra en forma natural en las aguas superficiales, pero en concentraciones menores a un mg/L. En estas concentraciones, el cobre no tiene efectos nocivos para la salud.

Se trata de un elemento benéfico para el metabolismo, esencial para la formación de la hemoglobina. La deficiencia de cobre ha sido asociada con la anemia nutricional de los niños.

Sin embargo, si se ingiere agua contaminada con niveles de cobre que superan los límites permitidos por las normas de calidad, a corto plazo pueden generarse molestias gastrointestinales. Exposiciones al cobre a largo plazo podrían causar lesiones hepáticas o renales.

Los peces (principalmente la trucha) son especialmente sensibles a este elemento y se ven indirectamente afectados cuando, al actuar el cobre como alguicida, elimina la capacidad de captación de oxígeno del agua y disminuye el OD a concentraciones tan pequeñas que ya no es posible el desarrollo de estas especies.

La presencia del cobre en el agua está relacionada principalmente con la corrosión de las cañerías en la vivienda, la erosión de depósitos naturales y el percolado de conservantes de madera, entre otros.

En algunos sistemas se aplica sulfato de cobre en dosis controladas como mecanismo para combatir las algas en el agua. Las dosis van de 0,1 a 2 mg/L.

En concentraciones altas, el cobre puede favorecer la corrosión del aluminio y el cinc y cambiar el sabor del agua.

Pruebas de coagulación en laboratorio han reportado una eficiencia en la remoción del cobre de entre 60 a 90% (10), dependiendo del pH y la turbiedad.

La EPA ha establecido una concentración máxima de 1,3 mg/L, que denomina *nivel de acción*; es decir, una concentración límite que sirve como un aviso para que los sistemas públicos de suministro de agua tomen medidas de tratamiento (si es necesario, adicionales) cuando los niveles de las muestras de agua superan en más de 10% los valores permitidos.

Las Guías de Calidad para Agua de Bebida del Canadá han recomendado un límite de un mg/L de cobre en aguas destinadas al consumo humano. El valor guía dado por la OMS es 2 mg/L.

2.2.16 Cromo

De las especies normalmente presentes en las aguas superficiales, el Cr (III) es esencial para los seres humanos, pues promueve la acción de la insulina. En cambio, el Cr (VI) es considerado tóxico por sus efectos fisiológicos adversos.

No se conoce de daños a la salud ocasionados por concentraciones menores de 0,05 mg/L de Cr (VI) en el agua.

El cromo metálico y los derivados del cromo (VI) usualmente son de origen antropogénico.

Por su naturaleza química, el Cr (III) difícilmente se encuentra con un pH mayor de 5, donde el cromo está, por lo general, en forma hexavalente.

La erosión de depósitos naturales y los efluentes industriales que contienen cromo (principalmente de acero, papel y curtiembres), se incorporan a los cuerpos de aguas superficiales. La forma química dependerá de la presencia de materia orgánica en el agua, pues si está presente en grandes cantidades, el cromo (VI) se reducirá a cromo (III), que se podrá absorber en las partículas o formar complejos insolubles.

Estos complejos pueden permanecer en suspensión y ser incorporados a los sedimentos. La proporción de cromo (III) es directamente proporcional a la profundidad de los sedimentos.

En teoría, el cromo (VI) puede resistir en este estado en aguas con bajo contenido de materia orgánica, mientras que con el pH natural de las aguas, el cromo (III) formará compuestos insolubles, a menos que se formen complejos. Se desconoce la proporción relativa de cromo (III) y cromo (VI) en las aguas.

En el tracto gastrointestinal de los humanos y los animales, se absorbe menos de 1% del cromo (III) y alrededor de 10% del cromo (VI). La forma química, la solubilidad del compuesto en agua y el tiempo de permanencia en los órganos modifican la velocidad de la absorción.

Los compuestos de cromo (VI), que son fuertes agentes oxidantes, tienden a ser irritantes y corrosivos; también son considerablemente más tóxicos que los compuestos de cromo (III) si la dosis y la solubilidad son similares. Se ha postulado

que esta diferencia en la toxicidad puede estar relacionada con la facilidad con la que el cromo (VI) atraviesa las membranas celulares y con su subsecuente reducción intracelular e intermediarios reactivos.

Se ha demostrado que el cromo (VI) es carcinógeno para los seres humanos, mientras que el cromo (0) y los derivados de cromo (III) aún no pueden clasificarse respecto a su carcinogenicidad.

Debido a su gran solubilidad, el Cr (VI) es más difícil de remover que el Cr (III). La cloración puede convertir por oxidación el Cr (III) en Cr (VI) y crear un problema en el tratamiento del agua.

A escala experimental, la remoción del cromo trivalente puede ser efectiva mediante la coagulación con alumbre o sulfato férrico, y en los sistemas de ablandamiento con cal. En este último proceso, el factor pH es muy importante.

Con un pH entre 10,6 y 11,3, la remoción puede llegar a 98%, mientras que a 9,2, la eficiencia baja a 70%.

La remoción del Cr (VI) es muy difícil mediante el tratamiento convencional de coagulantes. Se ha encontrado que el sulfato ferroso es razonablemente efectivo como reductor del Cr (VI) a Cr (III) (13). El ablandamiento cal-soda puede remover entre 80 y 90% de Cr (III), pero el Cr (VI) no se remueve a pH 9,5.

La EPA recomienda, como factor de seguridad, que el límite para cromo en fuentes de agua destinadas a consumo humano no exceda 0,1 mg/L como cromo total. Las guías de la OMS y del Canadá son más exigentes: 0,05 mg/L.

2.2.17 Dureza

Corresponde a la suma de los cationes polivalentes expresados como la cantidad equivalente de carbonato de calcio, de los cuales los más comunes son los de calcio y los de magnesio.

Aún no se ha definido si la dureza tiene efectos adversos sobre la salud. Pero se la asocia con el consumo de más jabón y detergente durante el lavado.

La dureza está relacionada con el pH y la alcalinidad; depende de ambos.

Un agua dura puede formar depósitos en las tuberías y hasta obstruirlas completamente. Esta característica física es nociva, particularmente en aguas de alimentación de calderas, en las cuales la alta temperatura favorece la formación de sedimentos.

La remoción de la dureza en el tratamiento se lleva a cabo mediante la precipitación con cal o mediante el proceso combinado cal-carbonato, conocido como *ablandamiento cal-soda*.

En términos generales, puede considerarse que un agua es blanda cuando tiene dureza menor de 100 mg/L; medianamente dura, cuando tiene de 100 a 200 mg/L; y dura, cuando tiene de 200 a 300 mg/L (en todos los casos, como CaCO_3).

Las normas de calidad no establecen un límite específico para la dureza en el agua para consumo humano.

2.2.18 Fenoles

Se definen como los hidróxidos derivados del benceno y su núcleo condensado.

Su presencia en el agua está relacionada con la descomposición de hojas y materia orgánica, ácidos húmicos y fúlvicos, pero principalmente se los asocia a procesos de contaminación de las fuentes por desechos industriales, aguas servidas, fungicidas y pesticidas, hidrólisis y oxidación de pesticidas organofosforados, degradación bacteriológica de herbicidas del ácido fenoxialquílico, entre otros.

Los compuestos fenólicos y los fenoles halogenados son tóxicos para el hombre a concentraciones altas. Pero aun en cantidades muy pequeñas, cambian las condiciones organolépticas del agua debido a su intenso olor y sabor, ambos desagradables.

Los compuestos fenólicos son muy difíciles de remover con los tratamientos convencionales.

Si un agua filtrada que contiene fenoles es sometida a la cloración, los derivados fenólicos clorados pueden cambiar el olor y el sabor del agua, lo que no necesariamente será percibido en la planta de tratamiento, pero sí puede manifestarse en las conexiones domiciliarias.

Las Guías de Calidad para Agua de Bebida del Canadá recomiendan que el contenido de los compuestos fenólicos no sea superior a 2 µg/L.

2.2.19 Fluoruros

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.

El cuadro 1-4 muestra las recomendaciones referidas al contenido de flúor en el agua, teniendo en cuenta la temperatura promedio anual del lugar.

Cuadro 1-4. Recomendación del contenido de flúor en el agua de consumo

Promedio anual de temperatura máxima del ambiente, °C*	Nivel óptimo de flúor en mg/L
10,0– 12,2	1,2
12,7– 14,4	1,1
15,0– 17,7	1,0
18,3– 21,6	0,9
22,2– 26,1	0,8
26,6– 32,7	0,7

* Datos de por lo menos cinco años.

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 (9) 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.

2.2.20 Fosfatos

Las especies químicas de fósforo más comunes en el agua son los ortofosfatos, los fosfatos condensados (piro-, meta- y polifosfatos) y los fosfatos orgánicos. Estos fosfatos pueden estar solubles como partículas de detritus o en los cuerpos de los organismos acuáticos.

Es común encontrar fosfatos en el agua. Son nutrientes de la vida acuática y limitantes del crecimiento de las plantas. Sin embargo, su presencia está asociada con la eutrofización de las aguas, con problemas de crecimiento de algas indeseables en embalses y lagos, con acumulación de sedimentos, etcétera.

Para una buena interpretación de la presencia de fosfatos en las fuentes de aguas crudas, es recomendable la diferenciación analítica de las especies químicas existentes en ellas.

La fuente principal de los fosfatos orgánicos son los procesos biológicos. Estos pueden generarse a partir de los ortofosfatos en procesos de tratamiento biológico o por los organismos acuáticos del cuerpo hídrico.

Otra fuente importante de fosfatos en las aguas superficiales son las descargas de aguas que contienen como residuo detergentes comerciales.

Concentraciones relativamente bajas de complejos fosforados afectan el proceso de coagulación durante el tratamiento del agua.

Las normas de calidad de agua no han establecido un límite definitivo. Sin embargo, es necesario estudiar la concentración de fosfatos en el agua, su relación

con la productividad biológica y los problemas que estos pueden generar en el proceso de filtración y en la producción de olores.

2.2.21 Hidrocarburos

La mayor parte de los hidrocarburos que se pueden encontrar en el agua son tóxicos. Sin embargo, concentraciones que no llegan a repercutir en la salud pueden causar molestias e inconvenientes, ya que comunican al agua propiedades organolépticas (sabor y olor) indeseables, interfieren en el tratamiento y atraviesan los filtros de arena.

En algunos casos, estos compuestos presentes en el agua pueden llegar a producir dermatitis.

Su presencia en el agua superficial se debe a descargas de desechos industriales y a derrames accidentales.

El agua de lluvia puede arrastrar cantidades notables de hidrocarburos en suspensión, derivados de la combustión, de desechos de automotores, asfalto, etcétera. Algunos de estos productos de combustión son carcinógenos y deben estar ausentes en el agua de consumo humano.

Las normas de calidad del agua especifican que estos compuestos tienen que estar ausentes en el agua de consumo humano.

2.2.22 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: $\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$.

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 ion 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.

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

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 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.

2.2.23 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.

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.

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.

2.2.24 Materia orgánica

Las aguas naturales, además de sustancias minerales y disueltas, pueden llevar en suspensión sustancias orgánicas provenientes del lavado de los suelos o del metabolismo de los organismos que viven en ellos. Además, los cuerpos de aguas superficiales pueden recibir descargas de aguas residuales de origen doméstico o industrial, las cuales provocan la polución y la contaminación en niveles variables.

Las sustancias provenientes del lavado de suelos son principalmente ácidos húmicos, mientras que las producidas por el metabolismo de los organismos acuáticos son los hidratos de carbono, las proteínas, las aminas, los lípidos, etcétera, así como pigmentos, hormonas y vitaminas, que funcionan como catalizadores o inhibidores de las funciones biológicas.

Las sustancias provenientes de los desechos animales son principalmente derivados de la urea o úrea, la cadaverina y la putrescina, entre otros.

Estas sustancias orgánicas representan una fuente de alimentación para los organismos (autótrofos y heterótrofos) presentes en el agua. Tienden a desaparecer progresivamente por oxidación, y pasar a CO_2 , amoníaco, nitritos, nitratos, etcétera.

Por lo general, las aguas naturales no contaminadas presentan cantidades mínimas de materia orgánica, salvo aquellas que provienen de bosques o aguas estancadas.

La materia orgánica puede ser, en muchos casos, la responsable del color, el olor y el sabor del agua, los cuales deben ser eliminados durante el tratamiento a fin de hacerla apta para el consumo humano.

Como es muy difícil determinar analíticamente la presencia de estas sustancias orgánicas en el agua, se han establecido métodos globales de determinación. Estos son los siguientes:

a) Demanda Bioquímica de Oxígeno: DBO5

Corresponde a la cantidad de oxígeno necesario para descomponer la materia orgánica por acción bioquímica aerobia. Se expresa en mg/L. Esta demanda es ejercida por las sustancias carbonadas, las nitrogenadas y ciertos compuestos químicos reductores.

Es una prueba que reduce a números un fenómeno natural, muy sencillo en teoría, pero en esencia muy complejo.

El cálculo se efectúa mediante la determinación del contenido inicial de oxígeno de una muestra dada y lo que queda después de cinco días en otra muestra semejante, conservada en un frasco cerrado a 20 °C. La diferencia entre los dos contenidos corresponde a la DBO5.

b) Demanda Química de Oxígeno: DQO

Equivale a la cantidad de oxígeno consumido por los cuerpos reductores presentes en un agua sin la intervención de los organismos vivos.

La eliminación de la materia orgánica se lleva a cabo mediante la coagulación-floculación, la sedimentación y la filtración. Sin embargo, cuando la fuente de agua cruda tiene una carga orgánica y bacteriana muy grande —caso en el que la DBO5 puede alcanzar valores muy altos—, será necesaria

una precloración, que debe constituirse en un proceso adecuadamente controlado.

Lo deseable es que las fuentes de agua cruda no presenten una carga orgánica elevada.

Por la naturaleza de estos parámetros, las normas de calidad de agua establecen que los causantes de la contaminación orgánica deben estar ausentes en las aguas para consumo humano.

2.2.25 Mercurio

Se considera al mercurio un contaminante no deseable del agua.

El mercurio es un metal pesado muy tóxico para el hombre en las formas aguda y crónica. En el tracto intestinal las sales mercuriosas son menos solubles que las mercúricas y, por lo tanto, son menos nocivas. Se considera que dosis de 20 y 50 mg/L en la forma mercúrica son fatales.

En el agua, el Hg se encuentra principalmente en forma inorgánica, que puede pasar a compuestos orgánicos por acción de los microorganismos presentes en los sedimentos. De estos, puede trasladarse al plancton, a las algas y, sucesivamente, a los organismos de niveles tróficos superiores como los peces, las aves rapaces e incluso al hombre.

El mercurio metálico y el inorgánico se convierten en mercurio metilado por medio de procesos biológicos que se producen en el agua contaminada con este metal. Tanto el dimetil mercurio $\text{Hg}(\text{CH}_3)_2$ como el ion metilo de mercurio HgCH_3^+ son absorbidos por los tejidos de los organismos vivos. Estas especies químicas se bioacumulan, permanecen durante largos periodos en los tejidos y pueden incorporarse en la cadena alimentaria biomagnificándose.

La permeabilidad del mercurio elemental en los lípidos es más alta que la de la forma ionizada y, en consecuencia, el Hg^0 puede atravesar las barreras hematoencefálica y placentaria.

La absorción gastrointestinal de sales de mercurio divalentes o monovalentes a partir de los alimentos es de aproximadamente 20% del Hg ingerido.

En términos de su toxicidad y sus efectos adversos sobre la salud, el metilmercurio es la forma más importante de mercurio orgánico. Sus efectos son básicamente neurotóxicos y genotóxicos.

Los niveles aceptables de ingestión de mercurio se basan en evidencias epidemiológicas mediante las cuales se sabe que la menor concentración de metilmercurio en la sangre asociada con síntomas tóxicos es 0,2 microgramos por gramo de peso, que corresponde a una prolongada y continua ingestión de 0,3 mg/70 kilogramos por día.

Las pruebas realizadas en plantas piloto demuestran que la remoción de mercurio inorgánico depende del pH y de la turbiedad del agua y tienen poca dependencia de la concentración de mercurio, cuando se encuentra entre 0,003 y 0,016 mg/L.

Experimentalmente, se ha comprobado que el tratamiento convencional de coagulación-filtración mediante aluminio o sulfato férrico puede remover entre 70 y 80% de mercurio inorgánico en aguas crudas turbias (13, 14). Sin embargo, en aguas claras la remoción puede reducirse a la mitad o menos.

La coagulación con sulfato férrico (17 mg/L) probó ser 66% efectiva con pH 7 y 97% con pH 8. El sulfato de aluminio es menos eficiente y logra solamente 38% de efectividad a pH 8.

La turbiedad desempeña un papel importante en la reducción de las concentraciones de mercurio en el agua, pues experimentalmente se ha demostrado que con turbiedades mayores de 100 UNT, la eficiencia crece sustantivamente.

Con respecto al mercurio orgánico, el proceso de ablandamiento con cal es moderadamente efectivo y dependiente del pH y llega a 30% con pH 9,4 y alcanza entre 60 y 80% con pH entre 10,7 y 11,4.

Se ha probado experimentalmente que las resinas de intercambio iónico son efectivas en la remoción de mercurio hasta 98%, tanto en la forma orgánica como inorgánica.

Sobre la base de las consideraciones mencionadas, la EPA recomienda no exceder el límite de 0,002 mg/L como mercurio total. Las guías de la OMS y del Canadá recomiendan una concentración máxima de 0,001 mg/L.

2.2.26 Nitritos y nitratos

El nitrógeno es un nutriente importante para el desarrollo de los animales y las plantas acuáticas. Por lo general, en el agua se lo encuentra formando amoníaco, nitratos y nitritos.

Si un recurso hídrico recibe descargas de aguas residuales domésticas, el nitrógeno estará presente como nitrógeno orgánico amoniacal, el cual, en contacto con el oxígeno disuelto, se irá transformando por oxidación en nitritos y nitratos. Este proceso de nitrificación depende de la temperatura, del contenido de oxígeno disuelto y del pH del agua.

En general, los nitratos (sales del ácido nítrico, HNO_3) son muy solubles en agua debido a la polaridad del ion. En los sistemas acuáticos y terrestres, los materiales nitrogenados tienden a transformarse en nitratos.

Los nitritos (sales de ácido nitroso, HNO_2) son solubles en agua. Se transforman naturalmente a partir de los nitratos, ya sea por oxidación bacteriana incompleta del nitrógeno en los sistemas acuáticos y terrestres o por reducción bacteriana.

El ion nitrito es menos estable que el ion nitrato. Es muy reactivo y puede actuar como agente oxidante y reductor, por lo que solo se lo encuentra en cantidades apreciables en condiciones de baja oxigenación. Esta es la causa de que los nitritos se transformen rápidamente para dar nitratos y que, generalmente, estos últimos predominen en las aguas, tanto superficiales como subterráneas. Esta reacción de oxidación se puede efectuar en los sistemas biológicos y también por factores abióticos.

El uso excesivo de fertilizantes nitrogenados, incluyendo el amoníaco, y la contaminación causada por la acumulación de excretas humanas y animales pueden contribuir a elevar la concentración de nitratos en agua. Generalmente, los nitratos son solubles, por lo que son movilizados con facilidad de los sedimentos por las aguas superficiales y subterráneas.

Después de la absorción, tanto nitratos como nitritos se distribuyen con rapidez a todos los tejidos.

Una vez en la sangre, el nitrito reacciona con el ion ferroso (Fe^{2+}) de la desoxihemoglobina y forma metahemoglobina, en la cual el hierro se encuentra en estado férrico (Fe^{3+}), por lo que es incapaz de transportar el oxígeno. Por ello se relaciona al nitrito con una anomalía en la sangre de los niños (metahemoglobinemia) por la ingestión de aguas con un contenido mayor de 10 mg/L de nitratos (como N) y como resultado de la conversión de nitrato en nitrito. La mayor parte de estos casos se asocian a aguas que contienen más de 45 mg/L de nitrato (10 mg/L como $\text{NO}_3\text{-N}$).

Aunque se ha comprobado que bebés menores de 6 meses que ingieren nitratos en concentraciones altas pueden morir si no reciben tratamiento inmediato, es importante anotar que no todos los niños que ingieren aguas con altos contenidos de nitratos (10 mg/L o más) necesariamente desarrollan la enfermedad. Para ello se requiere una predisposición natural. En este caso, la edad es un factor determinante, porque rara vez se presenta en niños de más de seis meses y mucho menos en adultos.

La presencia de nitratos y nitritos no es extraña, especialmente en aguas almacenadas en cisternas en comunidades rurales.

Aunque la toxicidad relativa de los nitratos es bien conocida, es difícil establecer cuál es el nivel de una dosis nociva. Los nitritos tienen mayor efecto nocivo que los nitratos, pero como generalmente en las aguas naturales no se presentan niveles mayores de 1 mg/L y la oxidación con cloro los convierte en nitratos, el problema prácticamente queda solucionado.

Es importante destacar que aunque el agente responsable de esta enfermedad son los nitritos, debido a que estos se forman naturalmente a partir de los nitratos, un factor determinante en la incidencia de esta enfermedad es la concentración de nitratos en el agua y los alimentos. Para dar una idea de la gravedad y magnitud potencial de este problema, basta mencionar que los datos obtenidos a través del Sistema Mundial de Vigilancia del Medio Ambiente (GEMS, por sus siglas en inglés) indican que 10% de los ríos estudiados en todo el mundo tenían concentraciones de nitratos por encima del límite recomendado por la OMS. Los estudios de GEMS también encontraron que en Europa 15% de los ríos tenían concentraciones de nitratos hasta 45 veces mayores que la concentración natural.

Los métodos tradicionales de floculación e incluso ablandamiento con cal no son efectivos para la remoción de nitratos. El más eficiente es el de resinas de

intercambio iónico, que puede remover concentraciones tan altas como 30 mg/L y reducirlas hasta 0,5 mg/L en procesos continuos.

En la práctica, difícilmente los nitritos se encuentran en aguas tratadas debido a que se oxidan fácilmente y se convierten en nitratos durante la cloración.

Por sus efectos adversos para la salud de los lactantes y porque no se tienen procesos definitivos para su remoción, el contenido de nitratos en aguas de consumo público no debe exceder, según la EPA, de 10 mg/L. Puesto que los nitritos tienen un efecto tóxico superior a los nitratos, el contenido no debe exceder de un mg/L; en ambos casos, medidos como nitrógeno.

La OMS establece un valor guía provisional de 50 mg/L (N-NO₃) y 3 mg/L (N-NO₂), mientras que el Canadá recomienda un máximo de 10 mg/L para el primero y un mg/L para el segundo.

2.2.27 Oxígeno disuelto (OD)

Su presencia es esencial en el agua; proviene principalmente del aire.

Niveles bajos o ausencia de oxígeno en el agua. Puede indicar contaminación elevada, condiciones sépticas de materia orgánica o una actividad bacteriana intensa; por ello se le puede considerar como un indicador de contaminación.

La presencia de oxígeno disuelto en el agua cruda depende de la temperatura, la presión y la mineralización del agua. La ley de Henry y Dalton dice: “La solubilidad de un gas en un líquido es directamente proporcional a la presión parcial e inversamente proporcional a la temperatura”. El agua destilada es capaz de disolver más oxígeno que el agua cruda.

No es posible establecer un contenido ideal de oxígeno en el agua, ya que hay aspectos positivos y negativos de su presencia. Sin embargo, si el agua contiene amoníaco o hierro y manganeso en sus formas reducidas, es preferible que el OD esté cercano al punto de saturación.

Las aguas superficiales no contaminadas, si son corrientes, suelen estar saturadas de oxígeno y a veces incluso sobresaturadas; su contenido depende de la aereación, de las plantas verdes presentes en el agua, de la temperatura y de la hora del día (mañana o tarde), etcétera.

De la observación de los datos de OD en algunos ríos se deduce que en la mayoría de ellos se presentan contaminaciones esporádicas que no afectan para nada el estado general de los mismos y representan solamente fenómenos locales. Por otra parte, durante el verano el caudal de un río disminuye, por lo que también lo hace la cantidad total de oxígeno disponible y, por tanto, el consumo de este por los seres vivos acuáticos aumenta por unidad de volumen. Por eso no es extraño que haya grandes diferencias entre el verano y el invierno en lo que se refiere al OD.

Igualmente ocurre que este contenido varía del día a la noche, ya que los seres vivos consumen oxígeno para la respiración las 24 horas del día. Sin embargo, la fotosíntesis solo se realiza con el concurso de la luz solar.

Se ha demostrado la existencia de una estrecha relación entre la distribución de oxígeno y la productividad de materia orgánica, viva o muerta. Por otro lado, la cantidad de OD en un cuerpo de agua está relacionada con su capacidad de autodepuración.

En la práctica, se puede comprobar que a 10 °C, la distribución del oxígeno en el agua está regida por la presencia de materias vivas mediante la respiración y muertas mediante la descomposición. En cambio, a temperaturas de 20 °C o mayores, es el metabolismo del conjunto de los organismos vivos presentes el que determina esta distribución.

El agua potable debe contener cierta cantidad de oxígeno disuelto. Debe estar bien aerada y es muy importante tener en cuenta las variaciones relativas de oxígeno disuelto, ya que si estas son grandes, es síntoma de un probable aumento de vegetales, materia orgánica, gérmenes aerobios, reductores inorgánicos, etcétera.

En algunos casos, el contenido de OD puede influir en las propiedades corrosivas del agua, dependiendo de la temperatura (a mayor temperatura, mayor corrosión) y del pH (a menor pH, mayor corrosión). Si este es el caso, en aguas que tienen suficiente contenido en calcio, se reduce la corrosión y se eleva el pH al valor de saturación del carbonato cálcico.

2.2.28 *pH*

Es un parámetro básico que indica el grado de acidez o basicidad del agua.

Este parámetro tiene mucha influencia en una serie de reacciones que ocurren en el agua.

Por lo general, un agua con pH menor de 6,0 es considerada agresiva y corrosiva para los metales.

Un pH ácido en el agua no necesariamente indica la presencia de ácidos, pues algunas sales como las de aluminio pueden generar pH 4 por hidrólisis.

El pH tiene gran importancia en el tratamiento del agua, especialmente en la coagulación, desinfección y estabilización.

Durante la coagulación, la remoción de la turbiedad es eficiente por lo general en un rango de pH de 6,0 a 7,8, mientras que la remoción del color se consigue con un pH de entre 4 y 6. Sin embargo, es necesario puntualizar que el pH óptimo para ambos casos debe determinarse por medio de la prueba de jarras.

La desinfección con cloro es más efectiva a un nivel bajo de pH. Esto se debe a la mayor efectividad del ácido hipocloroso comparado con el ion hipoclorito y al hecho de que el ácido hipocloroso predomina con valores de pH bajos.

La estabilidad del agua depende del pH. Una planta de tratamiento debe producir agua que no sea ni corrosiva ni incrustante. En la práctica, esto significa que el pH del agua tratada debe ser ligeramente mayor que el pH de saturación. En otras palabras, el índice de saturación debe ser ligeramente positivo.

La medición del pH debe realizarse in situ, ya que puede sufrir variación importante en el transcurso del tiempo, debido a diversas causas, entre las cuales se encuentran la sobresaturación de CO₂, como consecuencia de la presencia de plantas acuáticas o su contenido en el aire, reacciones químicas, temperatura, etcétera. La variación del pH entre las mediciones en campo y las realizadas en el laboratorio puede llegar hasta la unidad, a pesar de haberse efectuado el mismo día.

El Canadá recomienda como valor guía para agua de bebida un rango 6,5 a 8,5 para el pH.

2.2.29 Plaguicidas

Este nombre agrupa a un gran número de compuestos orgánicos que se usan con diversos propósitos en el campo agrícola: control de plagas, maleza, hierba, etcétera. Entre los plaguicidas más comunes tenemos los hidrocarburos clorados, los carbamatos, los organofosforados y los clorofenoles. La presencia de estos compuestos en niveles tóxicos genera problemas en el agua y en el ambiente.

El efecto de los plaguicidas en la salud humana depende de su naturaleza química, pues mientras unos se acumulan en los tejidos, otros son metabolizados.

La remoción de los plaguicidas presentes en las aguas todavía se encuentra en la fase experimental, pero se sabe que su tratamiento con carbón activado reduce notoriamente los niveles de algunos de estos compuestos.

Las guías de calidad indican valores específicos en cada caso, todos a nivel de trazas.

2.2.30 Plata

No es un componente propio de las aguas naturales.

Se considera que en las personas que ingieren agua con cantidades excesivas de plata pueden presentar decoloración permanente e irreversible de la piel, los ojos y las membranas mucosas.

Todos los estudios que se han hecho sobre este elemento y sus posibles efectos son preliminares, por lo cual no se puede postular límites sobre los niveles que afectan la salud humana.

El proceso de floculación puede lograr una eficiencia de entre 70 y 80% mediante sulfato férrico con un pH entre 7 y 9 ó sulfato de aluminio con un pH entre 6 y 8. También ofrece buenos resultados el ablandamiento con cal con un pH entre 7 y 9.

Debido a que no hay suficiente información, las guías canadienses consideran que el límite no debe excederse de 0,05 mg/L en agua de consumo humano. Sin embargo, la OMS considera que no es necesario recomendar un límite de

concentración de plata en el agua de bebida, debido a que con concentraciones normalmente encontradas en ella, no se han detectado daños en la salud de los consumidores.

2.2.31 Plomo

Las fuentes naturales por lo general contienen plomo en concentraciones que varían notoriamente. Se pueden encontrar desde niveles tan pequeños como trazas hasta concentraciones importantes que contaminan definitivamente el recurso hídrico.

El plomo es un metal pesado en esencia tóxico; puede provocar en el hombre intoxicaciones agudas o crónicas. Es causa de la enfermedad denominada *satur-nismo*.

Es un elemento con gran capacidad de bioacumulación; afecta prácticamente a todos los órganos, tanto de los seres humanos como de los animales.

Los sistemas más sensibles a este metal son el nervioso (especialmente, en los niños), el hematopoyético y el cardiovascular.

En instalaciones antiguas, la mayor fuente de plomo en el agua de bebida proviene de las tuberías de abastecimiento y de las uniones de plomo. Si el agua es ácida, puede liberar gran cantidad de plomo de las tuberías, principalmente en aquellas en las que el líquido permanece estancado por largo tiempo. Aun en el agua estancada por corto tiempo en una tubería de cobre-plomo, la concentración de este último metal puede llegar a hasta 100 µg Pb/L.

La remoción del plomo presente en el agua en los procesos convencionales de floculación o ablandamiento con cal se realiza formando hidróxidos y carbonatos de plomo insolubles. Mediante este método es posible llegar a una eficiencia de 98%.

La coagulación con aluminio con un pH de 6,5 a 7 puede lograr una remoción de 60 a 80%. Con pH mayores de 9,5 la eficiencia de remoción sube a 90% (9, 10).

Cuando las aguas crudas de baja turbiedad contienen una alta concentración de plomo, el sulfato férrico puede ser más efectivo para su remoción (15).

El ablandamiento cal-soda con un pH entre 7 y 11 puede remover por encima del 90% de plomo en el agua (16).

Debido a que la exposición al plomo es muy común y por el peligro potencial que representa, las concentraciones de este metal en el agua deben ser las más bajas posibles.

La EPA ha establecido una concentración máxima de 0,015 mg/L, que denomina *nivel de acción*; es decir, una concentración límite que sirve como un aviso para que los sistemas públicos de suministro de agua tomen medidas de tratamiento (si es necesario, adicionales) cuando los niveles de las muestras de agua superen en más de 10% los valores permitidos.

Las Guías de Calidad para Agua de Bebida del Canadá especifican 0,05 mg/L mientras que la OMS es más exigente: 0,01 mg/L.

2.2.32 Selenio

Es raro encontrarlo disuelto en aguas naturales. Su origen, por lo general, está ligado a descargas de residuos mineros, petroleros e industriales, pero también puede provenir de la erosión de depósitos naturales.

Las especies más frecuentes son Se (IV) y Se (VI). Ambas formas son muy estables e independientes una de la otra. Los métodos tradicionales de análisis no hacen una distinción especial entre ambas.

Los efectos del selenio en el hombre son similares a los del arsénico y, al igual que este, puede causar intoxicaciones agudas y crónicas que en algunos casos pueden llegar a ser fatales. Entre los principales síntomas que presentan los intoxicados con selenio están la caída del cabello y de las uñas, el adormecimiento de los dedos de las manos y los pies y problemas circulatorios.

Pruebas de laboratorio y en plantas piloto han demostrado que la remoción del selenio es moderada (70–80%) en el proceso de coagulación con sulfato férrico con un pH entre 6 y 7, y que es menos efectiva con sulfato de aluminio. Los reportes indican que el intercambio iónico o la ósmosis inversa mejoran la efectividad de remoción, que puede llegar a ser superior a 90%.

Debido a que en la práctica el tratamiento solo tiene un efecto moderado en la remoción del selenio y a que sus efectos nocivos sobre la salud son comprobados, la EPA recomienda que en aguas destinadas al consumo humano, este elemento no esté por encima de 0,05 mg/L. El valor guía propuesto por la OMS y por el Canadá es 0,01 mg/L.

2.2.33 Sulfatos

Los sulfatos son un componente natural de las aguas superficiales y por lo general en ellas no se encuentran en concentraciones que puedan afectar su calidad.

Pueden provenir de la oxidación de los sulfuros existentes en el agua y, en función del contenido de calcio, podrían impartirle un carácter ácido.

Los sulfatos de calcio y magnesio contribuyen a la dureza del agua y constituyen la dureza permanente. El sulfato de magnesio confiere al agua un sabor amargo.

Un alto contenido de sulfatos puede proporcionar sabor al agua y podría tener un efecto laxante, sobre todo cuando se encuentra presente el magnesio. Este efecto es más significativo en niños y consumidores no habituados al agua de estas condiciones.

Cuando el sulfato se encuentra en concentraciones excesivas en el agua ácida, le confiere propiedades corrosivas.

La remoción de sulfato puede resultar costosa y requerir métodos complicados, por lo cual es preferible elegir fuentes naturales con niveles de sulfato por debajo de los límites aconsejados.

Por sus efectos laxantes, su influencia sobre el sabor y porque no hay métodos definidos para su remoción, la OMS recomienda que en aguas destinadas al consumo humano, el límite permisible no exceda 250 mg/L, pero indica, además, que este valor guía está destinado a evitar la probable corrosividad del agua. Las Guías de Calidad para Agua de Bebida del Canadá recomiendan un máximo de 500 mg/L.

3. CRITERIOS DE CALIDAD PARA LA SELECCIÓN DE UNA FUENTE DE AGUA CRUDA

3.1 Criterios fisicoquímicos

Antes de establecer los criterios de selección de una fuente de agua cruda, es necesario dividir en tres grandes grupos los principales contaminantes fisicoquímicos. Los detalles sobre cada contaminante en forma individual se han tratado en la sección anterior.

3.1.1 Contaminantes inorgánicos

Este es el grupo que más dificultades puede presentar, ya que los métodos convencionales de tratamiento no son efectivos en todos los casos.

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.

Aunque en teoría, en las plantas piloto existen sistemas para reducir o remover contaminantes inorgánicos deletéreos, como se expuso anteriormente, 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.

3.1.2 Contaminantes orgánicos

Los contaminantes orgánicos biodegradables son de fácil remoción y no constituyen problema durante el tratamiento, siempre y cuando se encuentren en concentraciones no excesivas. En este último caso, la precloración puede constituir una alternativa que debe ser cuidadosamente controlada para evitar la formación de contaminantes aún más peligrosos.

Los contaminantes orgánicos no biodegradables (hidrocarburos, pesticidas, productos aromáticos, etcétera) son un problema difícil de afrontar para plantas de tratamiento convencionales. En la mayoría de los casos, pueden ser controlados mediante la adición de carbón activado pulverizado o el uso de carbón activado granular dispuesto sobre los lechos de los filtros. Sin embargo, es necesario considerar que esto representa costos adicionales de tratamiento y un mayor control

analítico, en la mayoría de los casos especializado, de los procesos de tratamiento en planta.

Se debe tomar en cuenta, además, que los pesticidas que se mencionan en las normas de calidad representan a más de 700 compuestos orgánicos que han sido detectados en Estados Unidos en las aguas de bebida y que provienen de contaminaciones por descargas industriales o domésticas, escorrentías de zonas rurales o urbanas o descomposición natural de materia animal o vegetal.

Como se expuso, la descomposición de cierta materia vegetal genera ácidos húmicos que, en combinación con el cloro usado en la desinfección, da origen a la formación de trihalometanos, compuestos que últimamente están siendo asociados a la aparición de cáncer en animales de experimentación.

En casos en que se sospeche de la presencia de compuestos que puedan descomponerse en trihalometanos, el sistema de cloración deberá localizarse en otro punto o deberá cambiarse a otro agente desinfectante no halógeno como el ozono.

3.1.3 Contaminantes radiológicos

Se deben considerar dos tipos de contaminación radiológica: la natural y la provocada por el hombre.

Los radionúcleos naturales (emisores alfa) ocurren algunas veces en aguas subterráneas, pero el tratamiento con cal-soda empleado para el ablandamiento es suficiente para eliminarlos, así como la ósmosis reversa.

Los radionúcleos artificiales (emisores beta y gama) son el producto de residuos de plantas atómicas o de fallas en su control y, por lo tanto, son fácilmente controlables si se ejerce una vigilancia permanente sobre ellas, ya que para su eliminación se requieren estudios particulares en cada caso.

No se ha tratado el tema de los contaminantes radiológicos porque se ha considerado que están fuera de los alcances de este manual.

3.2 Criterios de selección de la fuente de agua cruda tomando en cuenta los aspectos fisicoquímicos

De acuerdo con lo expuesto anteriormente, para la adecuada selección de una fuente de agua cruda con fines de potabilización, es necesario tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- a) El origen de la fuente de agua cruda y la identificación de los principales afluentes y/o probables aportes de contaminación.
- b) La calidad del agua cruda, teniendo en cuenta todos los parámetros que pueden influir en la salud de los consumidores.
- c) El comportamiento de los constituyentes del agua, teniendo en cuenta los factores ambientales que pueden influir en él.
- d) La eficiencia del tratamiento empleado en la remoción de los tóxicos identificados.
- e) Los límites máximos de cada parámetro establecidos por las normas de calidad para el agua de consumo humano.

Por otro lado, el manejo racional de la calidad del agua requiere el conocimiento básico de los procesos que controlan la composición química del agua, a fin de estar en condiciones de decidir y planificar un adecuado tratamiento. Entre los temas más importantes están los siguientes:

- Las alteraciones fundamentales entre átomos y moléculas.
- Las reacciones químicas que involucran al agua y sus componentes líquidos, sólidos o gaseosos.
- Los medios usados para el estudio sistemático de estas reacciones, especialmente aquellos referidos a factores ambientales que influyen a través de un ciclo hidrológico.

Al evaluar un cuerpo hídrico superficial (río, lago, etcétera) como fuente de agua cruda para el consumo humano después del tratamiento, es necesario realizar inicialmente toda la gama de análisis fisicoquímicos con la finalidad de caracterizarla. Este proceso no debe consistir en un muestreo puntual sino en todo un

programa de monitoreo que considere las condiciones climáticas, geológicas y ambientales del lugar. Si se trata, por ejemplo, de un río, esta consideración ayudará a solucionar problemas posteriores. Solamente decidir la ubicación más adecuada del punto de captación del agua puede tener grandes implicancias, pues en muchos casos será posible identificar descargas que pueden modificar sustancialmente la composición del recurso hídrico, por ejemplo. Una vez ubicado el punto de descarga del contaminante, se podrá definir la captación aguas arriba de esta y solucionar así un problema importante para su potabilización e incluso reducir los costos del tratamiento.

4. EL AGUA POTABLE

4.1 Aspectos fisicoquímicos

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.

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

- a) Su apariencia estética: turbiedad, olor, color y sabor, espuma.
- b) 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.

4.2 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 1-3) 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:

- 1) Los valores establecidos para cada parámetro deben asegurar la aceptabilidad estética del agua y no representar riesgos para la salud del consumidor.
- 2) La calidad del agua debe ser adecuada para el consumo humano y tomar en cuenta todos los usos domésticos.
- 3) Los valores establecidos sirven como señal para que cuando se supere este valor:
 - a) Se investigue la causa
 - b) 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 manual 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 1-3).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Castro de Esparza, María Luisa. *Parámetros físico-químicos que influyen en la calidad y en el tratamiento del agua*. Lima, CEPIS, 1987.
- (2) Health and Welfare Canada. *Guidelines for Canadian Drinking Water Quality. Supply and Services*. Canadá: Hull, 1978.
- (3) OMS. *Guidelines for Drinking-Water Quality. Volume 2. Health criteria and other supporting information*. Segunda edición. Ginebra, 1996.
- (4) Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos-EPA. *Estándares del Reglamento Nacional Primario de Agua Potable*. EPA 815-F-00-007, 2000.
- (5) Trelles, R. A. El problema sanitario de las aguas destinadas a la bebida humana con altos contenidos de arsénico, vanadio y flúor. *Saneamiento* 34 (217), 1978, pp. 31-38.
- (6) Health and Welfare Canada. *A national survey for asbestos fibres in Canadian drinking-water supplies*. *Environmental Health Directorate*. 79 EHD 34, 1979.
- (7) Sorg T. J. y Logsdon, G. W. Treatment technology to meet the interim primary drinking water regulations for inorganics: Part 5. *Journal of the American Water Works Association* 72, 1980, pp. 411-422.
- (8) Krause, T. L. y Stover, E. L. Evaluating water treatment techniques for barium removal. *Journal of the American Water Works Association* 74, 1982, pp. 478-485.
- (9) Sorg, T. J. Treatment technology to meet the interim primary drinking water regulation for organics. *Journal of the American Water Works Association* 70, 1978, pp. 105-112.
- (10) NAS. *Drinking water and health. Safe drinking-water committee*, National Academy of Sciences, U. S. National Research Council, Washington, D. C., 1977.

- (11) White, G. C. Handbook of chlorination for potable water, wastewater, cooling water, industrial processes, and swimming pools. Van Nostrand Reinhold Co., Cincinnati, Ohio, 1972.
- (12) Leduc, G; Pierce, R. C. y McCracken I. R. The effects of cyanides on aquatic organisms with emphasis upon freshwater fishes. Ottawa: Associate Committee on Scientific Criteria for Environmental Quality, National Research Council of Canada, NRCC 19246, 1982.
- (13) Sorg, T. J. Treatment technology to meet the interim primary drinking water regulation for organics: Part 4. *Journal of the American Water Works Association* 71, 1979, pp. 454-466.
- (14) Logsdon, G. S. y Symons, J. M. Mercury removal by conventional water-treatment techniques. *Journal of the American Water Works Association* 65, 1973, pp. 554-562.
- (15) Agencia de Protección Ambiental de las Naciones Unidas-EPA. *In-depth Studies on Health and Environmental Impacts of Selected Water Pollutants*. EPA Contract 68-01-4646, 1978.
- (16) NAS. *Drinking Water and Health. Vol. 4*. National Academy of Sciences, Washington, D. C., U. S. National Research Council, 1982.