

Se agregó yoduro de sodio al sistema de abastecimiento de agua de una instalación naval. El sistema de abastecimiento de agua consistía en una fuente de aguas pluviales que se había desinfectado con cloro antes de su almacenamiento y distribución.

Durante las primeras 16 semanas del estudio se estimó que la dosis promedio por hombre era de 12 mg/día, y durante las últimas 10 semanas se aumentó la dosificación para proporcionar un promedio de 19,2 mg/día por persona. Se hicieron pruebas clínicas para detectar los efectos patológicos y las tendencias, y se hicieron comparaciones con el personal que no había recibido agua yodada. Se investigaron síntomas, signos y pruebas de laboratorio indicativas de enfermedad en los individuos expuestos. El análisis de los datos no reveló pérdida de peso, falla de visión, daño cardiovascular, actividad alterada de la tiroides, anemia, depresión de la médula ósea o irritación renal. La conclusión del estudio de seis meses fue que no había incidencia anormal de ninguna forma de enfermedades cutáneas; ninguna prueba de sensibilización al yodo entre el personal que recibía agua yodada; ninguna indicación de deterioro en la curación de heridas, ni resolución disminuida de infecciones como consecuencia del consumo de agua yodada.

Otra experiencia práctica de la desinfección con yodo consistió en utilizar dos sistemas de agua entubada que servían a tres prisiones en el Estado de la Florida. Estos sistemas fueron desinfectados con yodo por un período de cinco años, durante los cuales se mantuvo un residual entre 0,8 y 1,0 mg/litro. Antes de la yodación, se evaluaron dos veces 125 personas del grupo sometido a la prueba. Se les hizo un examen de la piel y la glándula tiroides; recuento de glóbulos blancos y diferencial; medición de la concentración de yodo sérico fijado a proteínas y tiroxina sérica; y medición de la absorción de yodo radiactivo por la glándula tiroides durante 24 horas. Se realizaron exámenes de seguimiento en los cinco años subsiguientes para detectar cambios en la salud, especialmente de naturaleza nociva. Ninguno de los presos dio muestras clínicas de hiper o hipotiroidismo en todo el estudio. Solo 29 personas del grupo inicial permanecieron en prisión durante todo el período de la prueba, y en seis de ellos la glándula tiroides estaba ligeramente agrandada. No hubo pruebas de ninguna reacción alérgica ni tampoco se registró ningún cambio en la concentración de tiroxina sérica. No se detectó ningún efecto nocivo sobre la función de la tiroides o la salud general durante todo el período de la prueba (62,63).

A continuación se citan las inquietudes expresadas por Zoeteman (60) de que el yodo podría afectar a la salud:

Tipos de desinfectantes y métodos de desinfección

"El yodismo es una reacción alérgica de las personas hipersensibles al yodo cuando la dosis terapéutica de yodo es mucho mayor que la requerida diariamente. La reacción alérgica puede ser de naturaleza aguda o crónica. El yodismo agudo se manifiesta por síntomas angioneuróticos, que van desde urticaria hasta exudados hemorrágicos. El yodismo crónico es más común que el agudo, siendo los síntomas principales rinitis crónica, aumento de volumen de las glándulas salivales y diversos exantemas acneiformes.

El trastorno conocido como *Jod-Basedow* es el desarrollo de hipertiroidismo en el curso de la terapia para el bocio cuando la dosis terapéutica es considerablemente mayor que la requerida diariamente. Como resultado de la carencia nutricional prolongada de yodo, pueden desarrollarse nodos hiperactivos en un bocio. Estos nódulos son los que segregan casi toda la hormona, permaneciendo prácticamente inactivo el tejido restante de la tiroides. Dado un suministro mayor de yodo, los nódulos pueden producir un exceso de hormona de tiroides, induciendo *Jod-Basedow*. Por lo tanto, el yodo no causa, sino más bien condiciona, el desarrollo de la enfermedad. Stanbury y sus colegas notificaron el caso de una mujer con bocio endémico que desarrolló el *Jod-Basedow* después de haberle administrado 1,5 mg de yodo al día. Por lo general, los síntomas desaparecen varias semanas después de haberse discontinuado la administración excesiva de yodo.

La tiroiditis por yodo algunas veces se presenta al comienzo de la terapia con yodo. Es un aumento de volumen del bocio que puede ser doloroso. La complicación puede ocurrir alrededor del séptimo día de terapia si se administran dosis grandes. Después de discontinuar la terapia con yodo, el bocio disminuye espontáneamente. La tiroiditis por yodo es un fenómeno inocuo transitorio.

El aumento de volumen del bocio, con o sin hipotiroidismo, ocurre después de la administración de dosis masivas de yodo (50-500 mg o más por día) para el tratamiento del asma bronquial o de arteriosclerosis. Este bocio inducido por yodo surge porque en algunas personas y animales el yodo en dosis grandes inhibe la descarga de la hormona de la tiroides en el torrente sanguíneo. La escasez de hormona de tiroides en la sangre da lugar a un aumento compensatorio en la secreción de tirotrópina, que produce el

aumento de volumen de la tiroides. Este tipo de bocio desaparece espontáneamente después de suspenderse la administración de yodo y de que la concentración de yodo en la sangre ha disminuido.

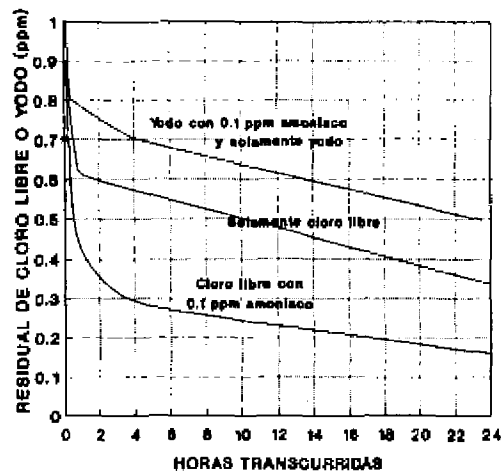
Ninguna de estas complicaciones de la terapia de yodo para el bocio es frecuente. De 1000 adultos, la mayoría de ellos con bocio nodular abultado, que recibieron dosis grandes de yodo (5-15 mg/día) bajo control cuidadoso y frecuente, solo un paciente desarrolló tiroiditis por yodo y uno de ellos *Iod-Basedow*.

La cuestión de usar yodo durante períodos prolongados de tiempo para la desinfección de agua ha sido debatida por muchos organismos de salud, principalmente debido a los efectos fisiológicos que el yodo puede surtir en personas sensibles al yodo.

Aunque no han habido pruebas médicas convincentes de los efectos adversos para la salud o de funcionamiento modificado de la tiroides en individuos sanos a los niveles de yodo que normalmente se mantendrían para desinfectar fuentes de agua (0,5 a 1,0 mg/litro), el intervalo del factor de seguridad es suficientemente estrecho de modo que la mayoría de los organismos de salud limitan esta forma de desinfección a emergencias o períodos breves de uso. Una ingesta corporal total de 2 mg (2000 microgramos) de yodo al día se aproxima al umbral del nivel tóxico de ingesta (64). Si el residual en el agua potable fuese de 1,0 mg/litro de yodo y la persona promedio bebiera 2 litros/día, no habría margen de seguridad para la ingesta adicional de yodo de otras fuentes, como los alimentos. Se estima que la ingesta alimentaria promedio de yodo por persona es de cerca de 400 microgramos/día (65); sin embargo, en las áreas donde se emplea sal yodada, la ingesta puede ser mayor, pues la concentración usual de yodo en la sal oscila entre 1:10.000 y 1:20.000 (por peso) y el consumo promedio diario de sal es de cerca de 10g por persona, haciendo que la ingesta de yodo en la sal sea de alrededor de 1,0 mg/día/persona.

Química

Como el yodo tiene el potencial de oxidación más bajo (0,54 voltios) de los halógenos comunes (Cuadro 1), reacciona con menos rapidez con sustancias y compuestos orgánicos, y prácticamente no forma yodaminas cuando es expuesto a sustancias nitrogenadas en el agua. La característica de reaccionar muy lentamente o nada con la mayoría de las sustancias comúnmente encontradas en los sistemas de abastecimiento de agua, es una ventaja única para mantener un residual eficaz en un sistema de distribución. La Figura 13 muestra la baja reactividad del yodo con el amoníaco en comparación con la reactividad considerable del cloro con el amoníaco. También ilustra que la demanda del yodo por otras sustancias es más baja que la del cloro (60).

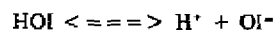
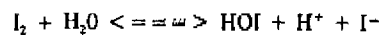


Fuente: Zacteman (1972)

FIGURA 13

Residual de cloro libre y de yodo durante un período de 24 horas, con y sin amoníaco en el agua, a 24°C y un pH de 7,5 (60)

El I_2 reacciona con el agua para formar ácido hipoyodoso (HOI) y el ión de yoduro (I^-). El ácido hipoyodoso después se disocia en el ión de hidrógeno (H^+) y el ión de hipoyoduro (OI^-). Esto se ilustra en las ecuaciones siguientes.



En el Cuadro 8 se compara el efecto del pH sobre la distribución de las especies de yodo y de cloro. A valores de pH superiores a 9, la autooxidación del ácido hipoyodoso (HOI) comienza a formar hipoyodato ($HOIO_2$), que tiene poca capacidad de desinfección. Afortunadamente, las especies predominantes siguen

siendo HOI hasta el pH 10, asegurando de ese modo la potencia como desinfectante en el intervalo más alto de pH encontrado en las fuentes de agua.

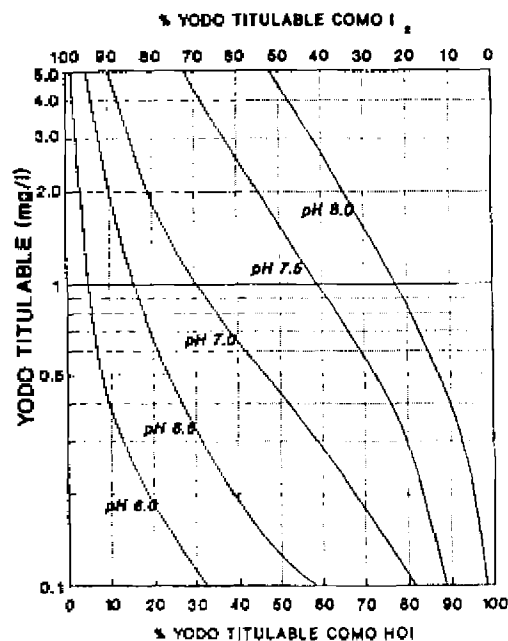
CUADRO 8
Efecto del pH en la hidrólisis del yodo y el cloro (60)

pH	Porcentaje de especies en el residual					
	I ₂	HOI	OI ⁻	Cl ₂	HOCl	OCl ⁻
5	99	1	0	0	99,5	0,5
6	90	10	0	0	96,5	3,5
7	52	48	0	0	72,5	27,5
8	12	88	0,005	0	21,5	78,5

La Figura 14 ilustra los porcentajes de yodo titulable (I₂) y HOI en el agua a 18°C y diferentes valores de pH (27) (28). Esto permite hacer una estimación de las especies desinfectantes disponibles en condiciones específicas.

Eficacia

El yodo ha sido reconocido como un desinfectante del agua potable desde principios de este siglo y se ha utilizado ampliamente para volúmenes pequeños de agua, como suministros de agua individuales en condiciones de campo y de emergencia. Actualmente, la forma más común es una tableta que fue desarrollada especialmente para las fuerzas armadas de los EE.UU. y que contiene hidroperóxido de tetraglicina, fosfato de ácido sódico y excipiente inerte (66). Estas tabletas se emplean en todo el mundo para la desinfección de emergencia del agua, y para excursionistas, caminantes y cazadores. El yodo también ha tenido uso limitado, pero exitoso, en la desinfección de suministros de agua pequeños semipúblicos, institucionales y agrícolas. Sin embargo, su utilización nunca se ha generalizado en abastecimientos públicos de agua, debido principalmente al estrecho margen de seguridad entre las dosificaciones necesarias para lograr una desinfección adecuada y el umbral para evitar que las personas sensibles al yodo (un porcentaje pequeño de la población general) sufran efectos adversos sobre la salud, y en parte debido a su alto costo unitario, que es cerca de 10 veces más que el del cloro.



Fuente: Chang (1968)

FIGURA 14
Porcentaje de yodo titulable como I_2 y HOI en agua a 18°C
y diferentes valores de pH (27) (28)

En general, el yodo satisface los criterios para un desinfectante enumerados en la Sección 2.2 de esta guía, y en algunos de ellos es sobresaliente. El yodo tiene muchas características de desinfección similares a las del cloro y el bromo.

El yodo libre (I_2) es un bactericida eficaz sobre un intervalo amplio de pH. El efecto de la concentración de yodo libre y del tiempo de exposición, el pH y la temperatura del agua en las bacterias entéricas fue investigado por Chambers et al. (67), quienes pudieron inactivar todos los microorganismos probados en menos de 5 minutos de tiempo de contacto. De 2°C a 5°C, encontraron que para un valor de pH de 9,0 se requería de 3 a 4 veces más yodo que el necesario para un pH de 7,5, pero incluso para una inactivación del >99,9% en agua de alto pH a >20°C, la dosificación requerida fue siempre menor de 1 mg/litro.

Chang (32) concluyó que el yodo molecular (I_2), debido a la ausencia de carga eléctrica, era mejor quisticida y esporicida que el cloro porque se difundía mejor a través de la pared de las células. Considerada de átomo a átomo, la eficacia bactericida del yodo es más o menos el doble que la del cloro.

El proyecto de cinco años de demostraciones y estudios realizado por Black et al. (62,63) mantuvo una dosificación de yodo de 1,0 mg/litro durante casi toda la duración. Hacia el final, la dosificación se redujo a 0,8 mg/litro, 0,6 mg/litro y 0,4 mg/litro, durante periodos subsiguientes de cuatro semanas cada uno, para determinar el efecto de la dosificación reducida. No se observó ninguna diferencia significativa en los datos bacteriológicos. El pH del agua era de 7,4, pero durante un período de tres meses se elevó artificialmente a 8,5. No hubo ningún cambio en la calidad bacteriológica del agua tratada durante todo este período, salvo en un fin de semana cuando la bomba de alimentación de yodo dejó de dosificar el sistema con yodo. Con las técnicas de examen de tubos múltiples y de filtro de membrana para detectar bacterias, el 0,6% y el 3,6% de las 2.539 muestras del sistema de distribución, respectivamente, no resultaron satisfactorias. El período de examen, incluyó el fin de semana cuando la bomba de alimentación dejó de funcionar, y el lapso en que las dosificaciones de yodo fueron inferiores.

Aunque se ha realizado un gran número de estudios sobre la inactivación de quistes por medio del yodo, parece haber considerable discrepancia en cuanto a la dosis, el pH, la temperatura, el número de quistes probados, la fuente de los quistes y los métodos de determinar la viabilidad; sin embargo, los investigadores en general están de acuerdo con que el yodo es un quisticida excelente en aguas con un pH bajo. Esto sugiere que el yodo molecular, I_2 , en lugar del ácido hipoyodoso (HOI), es la forma más eficaz. Chang (32) encontró que tanto el yodo diatómico (I_2) como el ácido hipocloroso (HOCl), cada uno con una concentración residual de 3,5 mg/litro, destruyeron los quistes amebianos en 10 minutos a 25°C. A un pH de 7 y una temperatura de 30°C, el yodo tiene un valor $C \cdot t_{90}$ de 80 para los quistes de *E. histolytica* (31). Este valor favorable de $C \cdot t$ se debe a que la especie de yodo predominante a un pH de 7 es I_2 , que tiene buenas propiedades quisticidas. Chang (68) calculó una eficiencia quisticida relativa del ácido hipoyodoso que sería de 1/3 y 1/2 con respecto a la del I_2 a 6°C y 25°C, respectivamente. En los sistemas de abastecimientos de agua que operan con un pH de 8 o mayor, la especie predominante es HOI, que no es un quisticida muy potente; esto podría presentar un problema, especialmente en el agua fría (10°), si están presentes quistes de *E. histolytica*, *G. lamblia* o *G. muris*.

El yodo es eficaz no sólo como bactericida sino también como virucida. Esto se ilustra en el Cuadro 9 (69). Chang (28)(32) informó sobre los efectos virucidas en 10 minutos a 25°C con una concentración de yodo diatómico de 14,6 ppm que resultaron ser comparables a los de 0,4 ppm de HOCl. El poliovirus 1 (uno de los más resistente a la desinfección) es más susceptible a la inactivación por HOI que I₂. El yodo, a diferencia de otros halógenos, se convierte en un virucida más eficaz a medida que sube el valor pH. A un pH de 6,0, el yodo tiene una actividad virucida ligeramente menor que el ácido hipocloroso, pero a un pH de 8, es más eficaz que el cloro porque la especie de cloro predominante es OCl⁻, que no es un virucida eficaz. Se cree que la inactivación vírica por yodo se atribuye a su reacción con aminoácidos y proteínas vitales (70). Considerando el conjunto de microorganismos (bacterias, virus, quistes de protozoos y esporas) que es preciso destruir en la mayoría de los sistemas de agua, Chang concluyó que el HOI era más eficaz que el I₂.

CUADRO 9
Concentraciones de yodo y tiempos de contacto necesarios para la inactivación del 99% de virus de poliomielitis y f₂ (69)

Micro-organismo	Yodo mg/litro	Tiempo contacto, min	Ct	pH	Temp. °C	Referencias
Virus f2	12	10	120	5,0	5	Kruse, 1969
Virus f2	7,5	10	75	6,0	5	Kruse, 1969
Virus f2	5	10	50	7,0	5	Kruse, 1969
Virus f2	3,3	10	33	8,0	5	Kruse, 1969
Virus f2	3,0	10	30	7,0	25 - 27	Kruse 1969
Poliovirus 1	30	3	90	4,0	25 - 27	Kruse, 1969
Poliovirus 1	1,25	39	49	6,0	25 - 27	Berg et al, 1974
Poliovirus 1	6,35	9	57	6,0	25 - 27	Berg et al, 1964
Poliovirus 1	20	1,5	30	7,0	25 - 27	Kruse, 1969
Poliovirus 1	30	0.5	15	10,0	25 - 27	Cramer et al, 1976

En el Cuadro 10 se comparan valores de $C \cdot t_{99}$ para bacterias coliformes, Poliovirus I, virus f_2 y quistes síncicos (69).

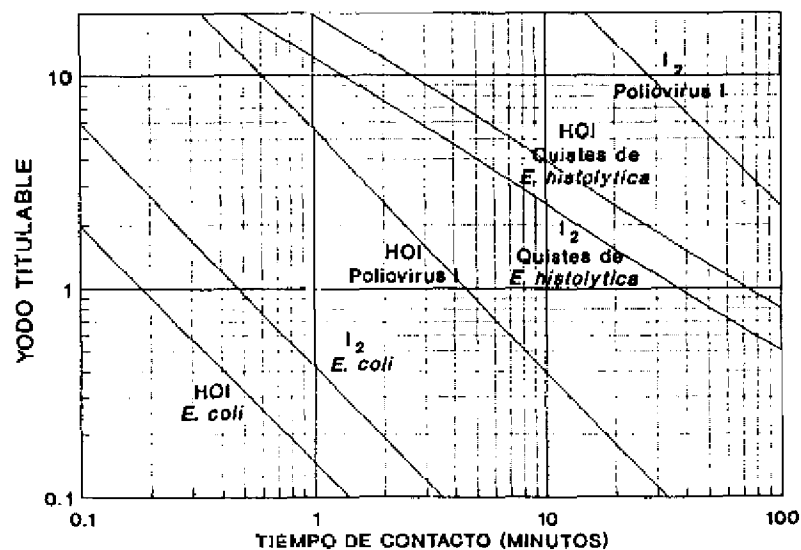
CUADRO 10
*Valores comparativos de los resultados de experimentos de
desinfección de agua con yodo entre 23°C y 30°C con un pH de 7,0 (69)*

Microorganismo	Yodo total mg/litro	Minutos para inactivación del 99%	Valor C-t
Bacterias coliformes	0,4	1	0,4
Poliovirus I	20	1,5	30
Virus f_2	10	3,0	30
Quistes síncicos	15	10,0	150

La Figura 15 presenta las curvas de C-t para I_2 y HOI a 18°C (60). Estos datos indican que el yodo se compara muy favorablemente con el cloro como desinfectante del agua. Al igual que otros halógenos, la eficacia del yodo contra bacterias y quistes de protozoos se reduce cuando el pH es alto, pero a diferencia del bromo y el cloro, la eficacia contra los virus aumenta cuando el pH es elevado.

Recientemente se ha utilizado yodo en combinación con cloro para eliminar la contaminación bacteriana persistente en sistemas de distribución de agua (71). Aparentemente existe un efecto sinérgico cuando se emplea en combinación con cloro, y juntos, aun a bajas concentraciones, estos dos halógenos pueden atravesar los revestimientos protectores que las bacterias forman sobre las paredes de las tuberías. Esto tiene considerable potencial para la desinfección y limpieza de sistemas pequeños infestados de microorganismos resistentes al cloro.

El yodo también se puede cargar en sitios disponibles en resinas básicas fuertes de intercambio de aniones de amonio cuaternario, formando complejos de resina-yoduro. Las resinas de polihaluro son pequeñas esferas que cuando se colocan en forma de columna crean un medio poroso a través del cual pasa el agua que se va a tratar. Se han publicado varios documentos (72) (73) (74) (75) (76) en los que



Fuente: Zoeteman (1972)

FIGURA 15
Destrucción de bacterias, quistes y virus por I₂ y HOI a 18°C (60)

se describe la acción biocida de estas resinas como "desinfectante por demanda" que mata los microorganismos al liberar el yodo que se encuentra sobre la superficie de la resina cuando los microorganismos entran en contacto con la resina cargada de yodo. Este es un mecanismo que difiere de aquel en que el microorganismo entra en contacto con un desinfectante en solución. En realidad, se libera algo de yodo de la resina en el agua que pasa a través de los intersticios de la columna de resina y esto puede proporcionar un residual de yodo en el agua tratada. Los fabricantes de estas resinas mantienen que se obtienen reducciones muy grandes en la mayoría de los agentes patógenos transmitidos por el agua, pero todavía no está absolutamente claro qué proporción de la reducción de bacterias, virus o protozoos se debe a la filtración, a la absorción, a la adsorción, a la descarga por demanda de desinfectante o al residual de yodo.

Métodos de análisis

Hay varias pruebas que podrían utilizarse para medir el residual de yodo libre en un abastecimientos de agua. El término yodo libre se emplea para designar el yodo que no se combina químicamente con sustancias que se encuentran en el agua y se puede determinar mediante la titulación amperométrica y el método colorimétrico de "leuco-crystal violet" (LCV). El método colorimétrico DPD para la determinación de la concentración de cloro libre también se ha usado con éxito tanto en el campo como en el laboratorio (77), correlacionándose suficientemente bien con las muestras estándar probadas por este método.

REFERENCIAS

- (60) Zoeteman, B.C.J. The suitability of iodine and iodine compounds as disinfectants for small water supplies, Technical paper No. 2, WHO, International reference centre for water supplies, La Haya - Países Bajos, julio de 1972.
- (61) Morgan, D.P. y R.J. Karpen, R.J. Test of chronic toxicity of iodine as related to the purification of water, United States Armed Forces Medical Journal, Vol.4, No. 5, pp 725-728, mayo de 1953.
- (62) Black, A.P., Thomas Jr., W.C., Kinman, R.N., Bonner, W.P., Keirn, M.A., Smith Jr., J.J. y Jabero, A.A. Iodine for disinfection of water, Jour.AWWA, enero de 1968, pp.69-83.
- (63) Black, A.P., Thomas, Jr. W.C., Kinman, R.N., Whittle, G.P. y Bonner, W.P. Studies in water pollution, Final Report, Demonstration Project Grant WPD 19 for FWPCA; junio de 1969.
- (64) Wolff, J. Iodine goiter and the pharmacological effects of excess of iodide, American J. of Med., 47, 101-124; 1969.
- (65) Fisher, K.D. y Carr, C.J. Iodine in foods: chemical methodology and sources of iodine in the human diet, Fed. of Am. Societies for Experimental Biology, 9650 Rockville Pike, Bethesda, Maryland; 1974.
- (66) Chang, S.L., Morris, J.C. Elemental iodine as a disinfectant for drinking water, Industrial and Engineering Chemistry, 45: 5, 1009 - 1012; 1953.

- (67) Chambers, C.W.; Kabler, P.W. Malaney, G. y A. Bryant, A. Iodine as a bactericide, Soap Sanit. Chem., 28(10) 149-165; 1952.
- (68) Chang, S.L. The use of active iodine as a water disinfectant. Journal of the American Pharmaceutical Association, Vol XLVII, No. 6; 1958.
- (69) National Academy of Sciences, Safe Drinking Water Committee. Drinking water and health, Vol. 2. National Academy Press, Washington D.C., p.65; 1980.
- (70) Hsu, Y.C., S. Nomura, y C.W. Kruse. Some bactericidal and viricidal properties of iodine not affecting RNA and DNA. Am. J. Epidemiology. 82:317 - 328; 1965.
- (71) Pickersgill, J. A coliform contamination of the Gander water supply, April to November 1987, presented at Canada's Third National Conference on Small System Alternatives, June 12 - 15, 1988, St. John's, Terranova, Canada.
- (72) Marchin, G.L. y L.R. Fina. Contact and demand-release disinfectants". Critical reviews in environmental control, 19: 4; 1989.
- (73) Fina, L.R. y J.L. Lambert. A broad-spectrum water disinfectant that releases germicide on demand, Proceedings Second World Congress, IWRA, New Delhi, India, diciembre de 1975, Vol. II: 53 - 59.
- (74) Taylor, S., L.R. Fina y J.L. Lambert. New water disinfectant: an insoluble quaternary ammonium resin-iodide combination that releases bactericide on demand, Appl. Microbiol., 20,720; 1970.
- (75) Gerba, C., Janauer, G. y Costello, M. Removal of poliovirus and rotavirus from tap water by a quaternary ammonium resin, Water Research, 18,17; 1984.
- (76) Marchin, G.L., Fina, L.R., Lambert, J.L. y Fina, G.T. Effect of resin disinfectants-I, and -J, on giardia muris and giardia lamblia. Applied and Environmental Microbiology. 965 - 969; Nov. 1983.
- (77) Health and Welfare, Canada, Environmental Health Directorate, Health Protection Branch Laboratory testing and evaluation of iodine-releasing point-of-use water treatment devices, diciembre de 1979 (80-EHD-46).

3.6 PROCESOS DE DESINFECCION MENORES Y EXPERIMENTALES

Bromo

Características

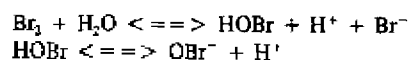
El bromo, un elemento de la familia de los halógenos, es un líquido oscuro, pardo rojizo a la presión atmosférica y temperatura ambiente. Esta característica de líquido lo hace, en cierto sentido, más fácil de manejar que el cloro gaseoso; sin embargo, hay que tener mucho cuidado debido a su toxicidad y corrosividad. El bromo es 3,1 veces más pesado que el agua; su temperatura de fusión es 7,3°C y el punto de ebullición es 58,7°C. Su potencial de oxidación de 1,07 voltios es inferior al del cloro, pero mayor que el del yodo (Cuadro 1, Capítulo 3) y, en general, sus propiedades químicas figuran más o menos entre las del cloro y el yodo. Se ha utilizado principalmente para el tratamiento de agua de piletas de natación y de torres de enfriamiento.

Efectos sobre la salud

El bromo líquido se vaporiza fácilmente y los gases son sumamente irritantes. La concentración máxima considerada segura para la exposición a largo plazo en el aire del ambiente de trabajo es 0,1 ppm. El líquido puede causar quemaduras graves si entra en contacto con la piel. El bromo es ligeramente soluble en agua. Para usarlo, pueden obtenerse soluciones saturadas haciendo pasar agua burbujeante a través del bromo líquido. Al igual que el cloro, hay que tener extremo cuidado al manejar el bromo, y se recomienda protección corporal completa cuando se usan grandes cantidades. El bromo, al igual que el cloro, forma trihalometanos. En condiciones especiales, la aplicación de cloro al agua que contenga bromo puede formar clorodibromometano y bromodiclorometano. En presencia de ácido fúlvico y de amoníaco, el cloro apenas produce cloroformo antes del punto de quiebre; en contraste, el bromo produce fácilmente bromoformo antes de este punto (78). La aplicación de ozono en la presencia de bromuro resulta en la formación de bromatos (6). Todos estos compuestos son motivo de preocupación debido a sus posibles efectos carcinogénicos.

Química

El bromo diatómico (Br_2) se hidroliza en el agua para producir ácido hipobromoso (HOBr) e ión de bromo (Br^-). A su vez, el ácido hipobromoso se ioniza para formar ión de hipobromito (OBr^-). Las proporciones de las especies dependen del pH del agua.



Eficacia como desinfectante

La actividad germicida del bromo se ha atribuido al ácido hipobromoso (HOBr) así como al ión de hipobromito (OBr^-), siendo ambas formas bactericidas eficaces. A concentraciones menores de 6,0 mg/litro y un pH entre 5,0 y 8,0 el bromo titulable existiría principalmente como Br_2 y HOBr; sin embargo, aumenta en eficacia a medida que sube el valor del pH, por lo que es más eficaz a un pH de 9,0 que a uno de 7,5 ó 6,0, según lo informado por Sollo (79); por otro lado, la eficacia del cloro aumenta a medida que bajan los valores de pH. El bromo, como el cloro, reacciona con el amoníaco para formar dibromamina y monobromamina. Se considera que esta última es un desinfectante tan eficaz como el bromo libre a altos valores de pH; esta característica también contrasta con la monocloramina, que es un desinfectante muy débil.

Se ha determinado que el bromo, comparado con el cloro y el yodo, es un quisticida amibiano más eficaz en todo el intervalo de pH. En agua destilada amortiguada con un pH de 4,0, una exposición de 10 minutos y una temperatura de 30°C, se necesitó un residual de bromo de 1,5 mg/litro para obtener una mortalidad quística del 99,9% (31). En condiciones similares, se necesitaron 5,0 mg/litro de yodo residual ó 2 mg/litro de cloro residual libre para obtener los mismos resultados. Comparados a un pH de 10,0, 4,0 mg/litro de bromo, 12 mg/litro de cloro y 20 mg/litro de yodo produjeron la misma tasa de mortalidad del 99,9%.

Aunque el bromo fue pionero como desinfectante de agua en los años treinta, ahora se emplea principalmente para desinfectar agua para sistemas de enfriamiento y piscinas. Los informes indican que su residual es más persistente que el del cloro, y que es menos irritante para los ojos. La dosificación de una solución saturada de bromo a una tasa constante es sencilla y puede hacerse con una bomba de desplazamiento positivo o haciendo borbotear una parte proporcional del flujo de agua a través de bromo líquido.

El uso del bromo para desinfectar agua para consumo humano ha sido utilizado en circunstancias específicas, pero las aplicaciones documentadas han sido pocas. Se ha prestado más atención a la desinfección con bromo de aguas residuales y de agua en torres enfriadoras. En consecuencia, existe poca experiencia en el uso del bromo para desinfección y otros fines en el tratamiento de agua potable. Se necesita más información sobre la eficacia germicida y en particular como virucida

y quística. Del mismo modo, se requieren más conocimientos sobre la formación de derivados indeseables y sus efectos sobre la salud.

Una de las desventajas principales del bromo para la desinfección de agua es su alto costo. Se estima que es casi 3,5 veces más costoso que el cloro, aunque podría serlo menos que el ozono. Por otro lado, el costo del equipo de dosificación y su operación, estimada con base en las instalaciones de desinfección de piscinas, probablemente sea relativamente bajo.

El hecho de que el bromo líquido tiene que venderse en botellas de vidrio o de cerámica de una, cinco o seis libras, pueden hacer su transporte demasiado peligroso o difícil para que sea práctico en áreas remotas y pueblos pequeños. En el mercado se pueden adquirir cajas de nueve botellas. El bromo también se encuentra como sólido en compuestos de diversos tipos. Estos son algo más seguros de manejar, pero también son mucho más costosos que el líquido.

En vista de las limitaciones indicadas, no se recomienda usar el bromo en sistemas de abastecimiento de agua potable.

Método de análisis

Se puede usar la prueba de la ortotolidina para detectar el bromo; sin embargo, hay que preparar normas específicamente para el bromo y ya se han indicado los problemas de este reactivo. La 18va edición de "Standard Methods" no incluye una prueba para el análisis del bromo en agua.

Iones metálicos

Se ha descubierto que los cationes de algunos metales, en particular del oro, plata, mercurio y cobre, tienen propiedades microbicidas. La actividad bactericida de estos metales en cantidades pequeñas fue observada hace mucho tiempo y se designó como "acción oligodinámica". De este grupo de cuatro metales, sólo la plata es digna de alguna consideración para la desinfección de abastecimientos de agua. La toxicidad del mercurio, el costo muy alto del oro y la poca eficacia bactericida del cobre y el mercurio (el cobre es un buen algicida y el mercurio es un buen fungicida) los descartan para fines prácticos. El uso de la plata es dudoso debido al costo y la eficacia limitada contra varios agentes patógenos comunes transmitidos por el agua.

La plata no es una sustancia particularmente tóxica para los seres humanos, y parece que el cuerpo humano sólo absorbe fracciones relativamente pequeñas de

ésta. La intoxicación con plata ha ocurrido a dosificaciones sumamente altas. El efecto principal de la plata es la argiria que es un descoloramiento de la piel, el pelo y las uñas, que puede resultar de la administración de plata en dosis elevadas con fines médicos. En las Guías de la OMS para el agua potable (6) no se recomienda ningún nivel para la plata, ya que es muy improbable que las ingestas de este metal con el agua, aire y alimentos sean considerables.

El proceso de desinfección con plata consiste en agregar cantidades muy pequeñas del ión metálico al agua que se va a tratar, dentro de un intervalo de 25 a 75 microgramos/litro. Esto se ha logrado añadiendo soluciones de sales de plata, o usando electrólisis o materiales revestidos de plata. El efecto bactericida aparentemente se debe a la capacidad de la plata para inmovilizar los grupos de sulfhidrilos en las proteínas y las enzimas de los microorganismos. La acción del ión de plata es muy lenta. Para la *Entamoeba histolytica*, Chang y Baxter (80) informaron que tomó seis minutos para que 106 mg/litro de Ag^+ destruyeran el 99 % de los quistes en agua a 23 °C y un pH de 6,0. Una concentración de 97 mg/litro de Ag^+ fue casi dos tercios menos eficiente que una concentración de 10 mg/litro de yodo como I_2 . La plata no se reconoce como un buen virucida. Su eficacia disminuye con valores decrecientes de pH y de temperatura, por lo cual se requerirían tiempos de contacto muy largos a temperaturas de 10 °C o menos.

Las sustancias orgánicas interfieren en la desinfección con plata, aunque esta puede ser menos susceptible a ello que el cloro. La plata también puede ser afectada por el contenido de minerales en el agua. Una ventaja de la plata como desinfectante de agua es que no produce sabores, olores, color o derivados. La plata residual puede persistir durante mucho tiempo, pero debido a la lentitud de la reacción a las dosificaciones usuales, tendría poco valor como protección residual.

En general, no se recomienda la plata para desinfectar abastecimientos de agua, aunque en las publicaciones sobre la materia existe información sobre su uso en unos pocos casos, principalmente en sistemas pequeños de abastecimiento de agua (principalmente privados) en países europeos. Su costo se ha estimado en cerca de doscientas veces más alto que el de otros desinfectantes más económicos, como el cloro.

En años recientes se ha despertado interés en el uso de iones metálicos para la desinfección del agua, en particular de iones de cobre:plata generados por electrólisis en combinación con el cloro. Los resultados preliminares obtenidos en la desinfección de agua de piscinas con cobre y plata (cerca de 400 microgramos/litro y 40 microgramos/litro, respectivamente), en combinación con 0,2 mg/litro de cloro, indican que puede haber un efecto sinérgico (81).

El equipo de dosificación puede ser relativamente sencillo y económico. También pueden simplificarse los requisitos operativos; sin embargo, la medición de la plata o el cobre en concentraciones tan bajas es algo compleja y es poco probable que se pueda realizar en el campo.

Calor

Hervir el agua es un medio eficaz de destruir agentes patógenos. En condiciones favorables, las bacterias patógenas pueden sobrevivir a una gran variedad de temperaturas, desde por debajo del punto de congelación hasta cerca de 60°C. Las bacterias termofílicas en realidad pueden cultivarse a alrededor de 70°C y sus esporas pueden resistir temperaturas superiores a los 100°C. Afortunadamente, las bacterias relacionadas con enfermedades transmitidas por el agua en su mayoría no forman esporas. En el Cuadro 11 se muestran los resultados experimentales de los efectos de la temperatura en la sobrevivencia de microorganismos (82). Este estudio consistió en elevar la temperatura del agua, rápidamente, hasta 100°C tomando muestras para el recuento estándar en placas a intervalos de 10°C. Todos los microorganismos fueron inactivados antes de los 60°C. Hervir el agua vigorosamente de uno a tres minutos puede ser un medio eficaz de desinfección. En ese sentido, también se ha considerado la temperatura del agua hirviendo a grandes altitudes. Como la temperatura de ebullición disminuye a razón de aproximadamente 1°C por cada 320 metros de altitud, a 3200 metros sobre el nivel del mar la temperatura de ebullición sería de tan solo alrededor de 90°C (100°C al nivel del mar) por lo cual el tiempo de ebullición requerido para inactivar los agentes patógenos sería más largo. Aún así, los tres minutos indicados proporcionan un factor de seguridad adecuado para todos los casos normalmente encontrados.

La ebullición matará las bacterias vegetativas pero quizás no afecte a las esporas. Los quistes de amebas se destruyen en 2 minutos en el agua a 50°C (4). Los virus también se inactivan luego de aproximadamente 1 y 3 minutos de ebullición (82) y, según Bingham (83), los quistes de *Giardia* se inactivan de inmediato cuando son sometidos al agua hirviendo.

Comparado con prácticamente todos los otros métodos de desinfección, el de ebullición generalmente es el más costoso, pues consume grandes cantidades de energía. También resulta difícil y poco práctico el manejar grandes cantidades de agua hirviendo o agua hervida. Se ha estimado que se necesita cerca de 1,0 kg de madera para hervir 1,0 litro de agua. Tan sólo este costo lo hace impracticable para usarlo a nivel de la comunidad. La ebullición muchas veces es apropiada en situaciones de emergencia o individualmente en los hogares. El sabor del agua

hervida puede ser desagradable, aunque la aeración suele mejorarlo algo en general no se recomienda por la posibilidad de recontaminación.

CUADRO 11
Calidad microbiana del agua sometida a diferentes temperaturas (82)

Temp. del agua (°C)	Tiempo de exposición (segundos)	Organismos sobrevivientes por ml (Recuento estándar en placa) (35°C-48 horas)
25	-	8.900
30	-	8.700
40	-	7.600
50	-	760
60	-	< 1
70	-	< 1
80	-	< 1
90	-	< 1
100	-	< 1

El proceso de pasteurización del agua es análogo al de la leche y no se logra una esterilización absoluta. Aquí entran en juego relaciones de tiempo-temperatura más precisas y es necesario recordar que el tiempo requerido para la muerte por calor aumenta con el número de microorganismos presente. Este hecho podría ser importante cuando se está tratando agua muy contaminada.

Goldstein et al. (84,85) diseñaron y probaron una unidad de pasteurización de agua de flujo continuo para usarla en las viviendas. Para no tener que mantener un gran volumen de agua a una temperatura de pasteurización baja, seleccionaron el

proceso de alta temperatura y tiempo breve (72°C durante 15 segundos). El sistema indicado puede producir 1.000 litros en un período de 12 horas. También diseñaron una unidad mayor con capacidad para producir 4.000 litros en 12 horas.

Las pruebas de destrucción de coliformes fueron satisfactorias, pues no se encontró ningún organismo en las porciones de 5/10 ml después de la filtración lenta con arena y la pasteurización. El sistema fue eficaz aun cuando se añadieron al agua a tratar altos recuentos de bacterias, de hasta 110 000/100 ml. Se estima que los filtros lentos de arena representaron aproximadamente dos órdenes de magnitud de la reducción, y la pasteurización otros dos órdenes.

El consumo promedio de energía se calculó en 1,0 kw-h por 100 litros de agua pasteurizada. El costo de la operación variará en función del costo de la energía eléctrica en cada lugar, pero en todo caso es de esperarse que la desinfección por este método sea costosa en comparación con otros métodos, por las limitaciones indicadas, y no es aplicable a abastecimientos públicos de agua, sin embargo, puede ser apropiado en casos especiales. La pasteurización no deja residuales y por lo tanto es necesario tomar precauciones para impedir la recontaminación.

Radiación gamma y rayos-X

La longitud de onda de los rayos gamma y los rayos-X empleados en la desinfección de agua oscila entre .01A y .001A. Estos tipos de radiación tienen mayor poder de penetración que la radiación ultravioleta. Existe poca información sobre la destrucción de microorganismos en el agua por estos medios. Aún con fuentes relativamente más baratas de radiación, como el Cobalto 60, la aplicación de la radiación gamma a la desinfección del agua parece estar limitada por razones prácticas. Ridenour y Armbruster (86) comunicaron que dosificaciones de 50.000 reps² fueron suficientes para reducir en un 99% cinco de los diez microorganismos de la prueba, y 100.000 reps redujeron en un 99% todos estos microorganismos, incluyendo el *Bacillus subtilis* formador de esporas, en agua contaminada. Los más resistentes fueron el *Streptococcus faecalis* y el *Bacillus subtilis*.

Se han reconocido dos mecanismos en la desinfección por radiaciones ionizantes (87): 1) El efecto directo en el cual el DNA de la célula es dañado por la energía liberada mediante la radiación, y 2) el efecto indirecto en el cual el

²Una unidad de dosis radiactiva equivale a la dosis absorbida en el agua que ha sido expuesta a un roentgen.

peróxido de hidrógeno, peróxidos orgánicos y radicales libres producidos dentro del menbruo de las células reaccionan para formar ozono.

En el Cuadro 12 se muestran las dosificaciones de la irradiación para inactivar diversos microorganismos, según informes de varios investigadores.

CUADRO 12
Dosificaciones de irradiación necesaria para la inactivación del 99% de diversos microorganismos en agua destilada

Microorganismo	Fuente de radiación	Dosis requerida (rad ³)
Bacillus subtilis (88)	Cobalto 60	3,5 x 10 ⁵
Escherichia coli (88)	Cobalto 60	6,5 x 10 ⁴
E. coliphage T3 (88)	Cobalto 60	3,2 x 10 ⁴
Poliovirus 2 (89)	Generador Van de Graff	3,0 x 10 ⁵
S. typhimurium (89)	Generador Van de Graff	1,0 x 10 ⁴
Virus Cocksackie B3 (89)	Generador Van de Graff	4,2 x 10 ⁵
E. coli K12 (89)	Generador Van de Graff	3,8 x 10 ⁴

La radiación ionizante puede ser un desinfectante eficaz del agua potable, pero igual que en el caso de la desinfección con radiación ultravioleta, no proporciona un residual para proteger contra la contaminación posterior y podrían surgir problemas de recrecimiento. Además, desde el punto de vista práctico, presenta complejos problemas de ingeniería para la instalación y operación de la fuente de radiación ionizante. Las disposiciones para las necesarias medidas preventivas para la protección de la salud de los operadores están fuera de la

³Una unidad de energía absorbida de la radiación ionizante; igual a 100 ergios por gramo de material irradiado.

capacidad incluso de operadores experimentados de plantas de tratamiento de agua, y más aún de operadores de plantas pequeñas. Por estas razones, se considera que la radiación ionizante no es apropiada para éstas.

Luz solar

La luz solar directa es un bactericida potente, principalmente debido a los rayos ultravioleta e infrarrojos del Sol; sin embargo, el uso de esta fuente de energía para la desinfección del agua, incluso para grupos pequeños de personas, tiene aplicación muy limitada. La luz solar tiene poco efecto sobre *Giardia lamblia*, *Entamoeba histolytica* y otros protozoos que se encuentran naturalmente en cuerpos de aguas claras. En el campo se han probado varios prototipos de dispositivos para la desinfección de agua con luz solar en los hogares, y pueden ser apropiados para cantidades muy pequeñas de agua bajo condiciones especiales. La luz difusa del día también inhibe el crecimiento bacteriano pero su efecto es muy limitado. Actualmente la desinfección del agua por radiación solar no es práctica para comunidades del rango que se trata en este documento.

REFERENCIAS

- (78) Rebhun, M. y Kumel, D. Bromoform formation in halogenation of fulvic acid. Conferencia de la AWWA; 1987.
- (79) Sollo, F.W.; Mueller, H.F.; Larson, T.E. y Johnson, J.D. Bromine Disinfection of Wastewater Effluents, en Disinfection: Water and Wastewater, Ann Arbor Science; 1975.
- (80) Chang, S.L. y Baxter, M. Studies on Destruction of Cysts of Endamoeba histolytica, American Journal of Hygiene, Vol.61, No.1, pp. 121-132; 1955.
- (81) Kutz, S.M.; Landun, L.K.; Yahya, M. T. y Gerba, C.P. Microbiological Evaluation of Copper/Silver Disinfection Units. Department of Nutrition and Food Science, Department of Microbiology and Immunology, University of Arizona, Tucson, AZ.
- (82) Geldreich, E.E. Drinking Water Microbiology - New Directions Toward Water Quality Enhancement. Personal communication.

- (83) Bingham, A.K., Jarrol, E.L., Meyer, E.A., y Radulescu, S., Giardia sp.: Physical Factors of Excystation in vitro and excystation vs. eosin exclusion as determinants of viability. Exp. Parasitol, 47:284-291; 1979.
- (84) Construction Plans for a continuous flow Pasteurizer for Small Water Supplies, Robert A. Taft, Sanitary Engineering Center, US Department of Education and Welfare, Cincinnati, Ohio, 1959.
- (85) Goldstein M. et al. Continuous-flow Water Pasteurizer for Small Supplies. Journal AWWA Vol. 52, No. 2, 247-254; Feb. 1960.
- (86) Ridenour, G.M. y Annabruster, E.H. Effect of High-Level Gamma Radiation on Disinfection of Water and Sewage. Jour AWWA, June 1956. 671-676.
- (87) Silverman, G.F. y A.J. Sinskey. Sterilization by ionizing radiation. PP. 542-567. S.S. Block, ed., Disinfection, Sterilization and Preservation, 2nd. ed. Lea & Febiger, Philadelphia, Pa; 1977.
- (88) Lowe, H.N., Jr., W.J. Lacy, B.F. Surkiewicz and R.F. Jaeger. Destruction of microorganisms in water, sewage, and sewage sludge by ionizing radiation. Journal AWWA. 48:1363-1372; 1956.
- (89) Massachusetts Institute of Technology. High energy electron radiation of wastewater liquid residuals. Informe presentado ante U.S. National Science Foundation. NSF Grant ENV 74 13016, NSF, Washington D.C.; dic. 31, 1977.