

COLORO

Keith A. Christman
Consejo de Química del Cloro
Arlington, VA, EUA

RESUMEN

La cloración ha desempeñado una función crítica al proteger los abastecimientos de agua potable de las enfermedades infecciosas transmitidas por agua durante casi un siglo. Se ha reconocido ampliamente a la cloración del agua potable como uno de los adelantos más significativos en la protección de la salud pública. La filtración y cloración prácticamente han eliminado las enfermedades transmitidas por agua, como el cólera, tifoidea, disentería y hepatitis A en países desarrollados. En los Estados Unidos, más de 98% de los sistemas de abastecimiento que desinfectan el agua potable usan cloro debido a su potencia germicida, economía y eficiencia. Además, los desinfectantes basados en cloro son los únicos desinfectantes principales con las propiedades residuales duraderas que previenen el recrecimiento microbiano y proporcionan protección continua durante la distribución de la planta de tratamiento al hogar. Este documento trata las ventajas y desventajas del cloro y actualiza al lector con respecto al conocimiento actual sobre subproductos de desinfección.

1. Historia

La cloración ha desempeñado una función crítica, ya que desde hace 90 años protege los abastecimientos de agua potable de enfermedades infecciosas transmitidas por el agua. La filtración y la desinfección de cloro del agua potable han sido responsables de gran parte del 50% de aumento de la expectativa de vida en los países desarrollados durante el siglo XX. Este hecho motivó a la revista *Life* citar recientemente a la filtración y cloración de agua potable como "probablemente el más significativo progreso de salud pública del milenio".

En 1846, el doctor Ignaz Semmelweis introdujo uno de los primeros usos del cloro como desinfectante. Mientras trabajaba en un hospital de Viena, determinó que la fiebre de los niños y otras infecciones eran transmitidas a los pacientes por los doctores que no se lavaban las manos después de cada examen. Instituyó un

procedimiento de desinfección que requería que los médicos se lavasen con jabón y agua de cloro. Uno de los primeros usos conocidos del cloro para la desinfección del agua se dio en 1854, cuando el Dr. John Snow intentó desinfectar el abastecimiento de agua de Bombas de la calle Broad en Londres después de un brote de cólera. Posteriormente se dio un brote de tifoidea; Sims Woodhead usó “solución de lejía” como una medida temporal para esterilizar las cañerías de distribución de agua potable en Maidstone, Kent (Inglaterra).

La cloración continua del agua potable empezó en los primeros años de este siglo en Gran Bretaña, donde su aplicación redujo repentinamente las muertes por tifoidea. Poco después de este notable éxito, la cloración en los



Estados Unidos empezó en la ciudad de Jersey, Nueva Jersey en 1908. Pronto, la adopción por parte de otras ciudades y pueblos en los Estados Unidos continuó y dio lugar a la eliminación virtual de las enfermedades transmitidas por agua, tales como el cólera, tifoidea, disentería y hepatitis A. (White, 1986) Antes de la llegada de la cloración para el tratamiento de agua potable, aproximadamente 25 de cada 100.000 personas morían anualmente en los Estados Unidos a causa de la fiebre tifoidea, una tasa de mortalidad que se aproximaba a la actual tasa asociada con accidentes automovilísticos.

2. Explicación de la destrucción de los agentes patógenos por medio del cloro

En 1881, el bacteriólogo alemán Robert Koch demostró bajo condiciones controladas de laboratorio que los cultivos puros de bacterias podían ser destruidos por hipoclorito (lejía). El grueso de la investigación sobre desinfección de cloro realizada desde los años cuarenta a los setenta con un énfasis en bacterias, proporcionó observaciones sobre la manera en que el cloro mata al microorganismo. Las observaciones que (1) las células bacterianas dosificadas con cloro liberan ácidos nucleicos, proteínas y potasio y (2) las funciones de la membrana, tales como la respiración y transporte activo, son más afectadas por el

cloro que los procesos citoplasmáticos, dirigen la atención de investigadores a la superficie de la célula bacteriana. La hipótesis fue que la pared de células bacterianas, bajo estrés ambiental, podría interactuar con el cloro. La exposición del cloro parece causar alteraciones físicas, químicas y bioquímicas en la pared de la célula. Por lo tanto, destruye la barrera protectora de la célula, con lo que concluyen las funciones vitales y da lugar a la muerte del microorganismo. Una posible secuencia de los casos durante la cloración sería: (1) la interrupción de la barrera de la pared de célula mediante reacciones del cloro con sitios proyectados en la superficie de células, (2) descarga de elementos constitutivos celulares vitales de la célula, (3) terminación de las funciones asociadas con membranas y (4) terminación de las funciones celulares dentro de la célula. Durante el curso de esta secuencia de casos, el microorganismo muere, lo que significa que ya no es capaz de crecer o causar enfermedad alguna. (Pregunte a los Expertos, sitio Web *Scientific American*, 1998)

2.1 Valores de TC

Para el tratamiento eficaz de agua, la industria del abastecimiento de agua ha reconocido la necesidad de exponer adecuadamente el desinfectante y dosificarlo suficientemente por un determinado período. En los años ochenta ambas funciones se combinaron, a través del desarrollo de los valores de TC para diversos desinfectantes.

El TC representa la combinación de la dosificación desinfectante y el período en que se ha expuesto el agua a la mínima cantidad del residuo desinfectante. Matemáticamente se representa como:

$$\begin{aligned} \text{TC} &= \text{tiempo de concentración} \times \\ &\text{concentración} = \text{concentración de desinfectante final en mg/l} \\ &\text{tiempo} = \text{tiempo mínimo de exposición en minutos} \end{aligned}$$

En una evaluación de la eficacia de desinfección, se eligieron dos tipos de organismos como substitutos de desinfección – la *Giardia* protozoaria y los virus. Los valores de TC establecidos para la desinfección de las aguas superficiales requieren plantas de tratamiento para lograr una reducción de tres logaritmos o 99,9% de *Giardia* y una reducción de cuatro logaritmos o 99,99% de virus. Los cuadros 1 y 2 proporcionan datos de TC para los diversos desinfectantes.

Es importante reconocer que el uso de cloro como desinfectante es sólo una parte del proceso de tratamiento. Igualmente importante es la necesidad de una mejor filtración para extraer los organismos. Una combinación de desinfección y filtración adecuada es más eficaz cuando se proporciona agua potable. Los experimentos recientes para controlar el *Criptosporidio* también indican la eficacia de la filtración en el proceso de tratamiento del agua.

Cuadro 1. Valores de TC para la reducción de 99,9% de *Giardia lamblia*

Desinfectante	pH	Temperatura °F (°C)					
		33,8 (1)	41 (5)	50 (10)	59 (15)	68 (20)	77 (25)
Cloro libre	6	165	116	87	58	44	29
	7	236	165	124	83	62	41
	8	346	243	182	122	91	61
	9	500	353	265	177	132	88
Ozono	6-9	2,9	1,9	1,4	0,95	0,72	0,48
Dióxido de cloro	6-9	63	26	23	19	15	11
Cloraminas	6-9	3800	2200	1850	1500	1100	750

Fuente: Manual de Orientación de la EPA (1989)

Cuadro 2. Valores de TC para la inactivación del Virus

Desinfectante	pH (6-9) Inactivación	Temperatura °F (°C)					
		39,9 (0,5)	41 (5)	50 (10)	59 (15)	68 (20)	77 (25)
Cloro libre	2	6	4	3	2	1	1
	3	9	6	4	3	2	1
	4	12	8	6	4	3	2
Ozono	2	0,9	0,6	0,5	0,3	0,25	0,15
	3	1,4	0,9	0,8	0,5	0,4	0,25
	4	1,8	1,2	1	0,6	0,5	0,3
Dióxido de cloro	2	8,4	5,6	4,2	2,8	2,1	-
	3	25,6	17,1	12,8	8,6	6,4	-
	4	50,1	33,4	25,1	16,7	12,5	-
Cloraminas	2	1243	857	643	428	321	214
	3	2063	1423	1067	712	534	356
	4	2883	1988	1491	994	746	497

Fuente: Manual de Orientación de la EPA (1989)

3. Cloro: el desinfectante preferido para el agua potable

Los productos químicos basados en cloro han sido los desinfectantes preferidos para tratar el agua potable durante casi un siglo. En realidad, 98% de todos los sistemas en los Estados Unidos que tratan el agua, emplean desinfectantes basados en cloro. En las instalaciones se emplea el cloro porque ha resultado sumamente bueno, es seguro de usar cuando se maneja adecuadamente y es muy eficaz en función de costos. Más de 200 millones de estadounidenses y canadienses reciben agua potable desinfectada con cloro cada día.

Cuadro 3. Prácticas de desinfección en los Estados Unidos

<u>Desinfectante</u>	<u>Porcentaje *</u>
Gas cloro	87,0
Ningún amoníaco	67,0
Amoníaco agregado	20,0
Cloro e hipoclorito	4,5
Cloro y dióxido de cloro	3,0
Cloro y dióxido de cloro y Nitrógeno amoniacal	1,5
Hipoclorito	1,5
Cloro e hipoclorito y Nitrógeno amoniacal	0,75
Cloro y dióxido de cloro e Hipoclorito	0,37
[Subtotal: 98,6% usan los desinfectantes basados en cloro]	
Ozono	0,37
Otro	0,75

* porcentaje de instalaciones que desinfectan
Fuente: 1989-1990 Encuesta del Comité de Desinfección de AWWA de las Prácticas de Desinfección

Los atributos más importantes del cloro son su potencia y persistencia germicida de amplio espectro en los sistemas de distribución de agua. Además, su capacidad para abordar eficiente y económicamente otros muchos sistemas de tratamiento de

agua, también ha contribuido a su amplio uso. Los compuestos basados en cloro son los únicos desinfectantes principales que presentan propiedades residuales duraderas. La protección residual previene un nuevo crecimiento microbiano y la contaminación del agua, dado que pasa de la planta de tratamiento a los grifos domésticos.

La popularidad del cloro en la desinfección de agua se basa en muchos factores. Un estudio realizado por J. Carrell Morris, de la Escuela de Medicina de la Universidad de Harvard identificó muchos de los beneficios del cloro en el tratamiento de agua (Morris, 1985).

- **Germicida potente.** El uso demostrado del cloro reduce el nivel de los microorganismos en el agua potable, los que causan enfermedades a niveles casi imposibles de medir.
- **Cualidades residuales.** El cloro produce una acción sostenida de desinfección residual "única entre los desinfectantes disponibles de agua en gran escala". La superioridad del cloro como un desinfectante residual sigue siendo válida hasta hoy. La presencia de un residuo sostenido mantiene la higiene del agua potable final de la planta de tratamiento al grifo del consumidor.
- **Control del gusto y olores.** La cloración del agua potable reduce los gustos y olores. El cloro oxida muchas sustancias que se presentan naturalmente, tales como las secreciones de algas malolientes y olores de la vegetación en putrefacción, lo que da como resultado agua potable sin olor y con mejor sabor.
- **Control de crecimiento biológico.** La potente acción germicida del cloro elimina las bacterias, moho y algas de limo. El cloro controla estos organismos molestos que por lo general crecen en reservorios, paredes de cañerías de transmisión de agua y tanques de almacenamiento.
- **Control químico.** El cloro en el tratamiento de agua destruye el sulfuro de hidrógeno, y extrae amoníaco y otros compuestos nitrogenados que tienen sabores desagradables y que obstaculizan la desinfección.

3.1 **Costos de equipo**

Los costos para el equipo varían según la cantidad y tipo de producto químico que se alimentará, el tipo de control requerido (si hay alguno) y las necesidades de instalación. En el cuadro 4 se enumeran los cálculos de los costos de equipos.

Cuadro 4. Costos de equipo

DESCRIPCIÓN

COSTOS

Dosificador manual de gas, envase montado	\$2.000
Dosificador automático de gas, pared montada	\$4.000
Dosificador automático de gas, gabinete montado	\$6.000
Bomba manual alimentada de compuestos químicos	\$1.000
Bomba automática alimentada de compuestos químicos	\$3.000
Detector de gas, pared montada	\$2.000
Estuche de emergencia, Tipo A	\$1.500
Estuche de emergencia, Tipo B	\$2.500

3.2 Costos operativos y de mantenimiento

Los costos de operación y mantenimiento asociados con la alimentación de cloro y gases amoniacales, así como las soluciones de hipoclorito y sales amoniacales, varían con el tipo de producto químico y con el tamaño y complejidad del equipo. El plan para los costos anuales de O&M varían de 10 a 20 por ciento de los costos de equipo. Los fabricantes de equipos proporcionan una lista de los repuestos recomendados que como mínimo deben estar disponibles. La mayoría de los fabricantes capacitarán al personal de la planta de tratamiento en el mantenimiento y servicio de su equipo. Además, algunos fabricantes proporcionarán un programa de intercambio para posibilitar la atención de su equipo en sus instalaciones. Así, el personal operativo podrá enviar el equipo a reparación, mientras se instala una unidad de repuesto o intercambio para operar durante el período del servicio de reparación.

4. Protección de la salud pública — un trabajo incompleto

El beneficio principal del agua potable clorada es la protección de la salud pública, a través del control de las enfermedades transmitidas por el agua. Desempeña una función primordial ya que controla los agentes patógenos en el agua que causan las enfermedades, tal como ocurre en los países desarrollados en que están virtualmente ausentes las enfermedades transmitidas por el agua, tales como la tifoidea y el cólera.

Los abastecimientos de agua potable sin tratar o con un tratamiento inadecuado, siguen siendo la mayor amenaza para la salud pública, especialmente en los países en desarrollo donde casi la mitad de la población consume agua contaminada. En estos países las enfermedades como el cólera, tifoidea y disentería crónica son endémicas, y matan a jóvenes y a ancianos. En 1990, más de tres millones de niños menores de cinco años murieron por enfermedades diarreicas. Lamentablemente, en muchas áreas prácticamente no hay disponibilidad de los abastecimientos de agua potable debido a la pobreza, poca comprensión de la contaminación de agua y falta de infraestructura de tratamiento y distribución. Los grupos asistenciales internacionales, incluida la Organización

Mundial de la Salud (OMS) y la Organización Panamericana de la Salud (OPS), reciben asistencia técnica y programas de educación desde hace muchos años para mejorar las prácticas de abastecimiento de agua y saneamiento. Se ha calculado que tales mejoras -incluida la desinfección de cloro- pueden prevenir 25% de los brotes diarreicos y reducir la mortalidad infantil en niveles similares (Craun, 1996).

Un ejemplo reciente de la continua amenaza a la salud pública debido a los brotes de enfermedades transmitidas por agua se dio en el Perú en 1991, donde un factor causal principal era la ausencia o insuficiencia de desinfección del agua potable. Este fracaso en el intento de desinfección se basó supuestamente en parte por la inquietud suscitada a raíz de los informes de los Estados Unidos, respecto a la presencia y riesgos potenciales de los subproductos clorados de desinfección. El resultado fue la aparición de una epidemia persistente del cólera, la primera en este siglo en las Américas. La epidemia se propagó a 19 países latinoamericanos y sólo se redujo parcialmente a través de las intervenciones de salud pública, apoyadas por el asesoramiento y asistencia técnica de la OPS. Se presentó un informe de aproximadamente un millón de casos y 10.000 muertes (Craun, 1996).

Estas estadísticas refuerzan firmemente el concepto de que la desinfección de agua debe ser una herramienta esencial para la protección de la salud pública mundial. Según destaca la Academia Estadounidense de Microbiología, "El requisito más importante que se debe recalcar es que no se debe comprometer la desinfección de un abastecimiento público de agua" (Ford y Colwell, 1996).

En la Primera Conferencia Internacional de 1992 sobre Seguridad de la Desinfección del Agua, un documento elaborado por Gunther F. Craun et al. trató la eficacia en función de los costos de tratamiento de agua para el retiro de agentes patógenos (Craun, 1994a). Una evaluación de cinco agentes patógenos y costos de tratamiento muestran los beneficios económicos favorables de prevenir las enfermedades infecciosas transmitidas por el agua. Estos beneficios se determinaron con base en una probabilidad anual de enfermedad y muerte, sin asumir el tratamiento de agua y un costo de \$3.000 por enfermedad y \$500.000 por muerte. La eficacia del tratamiento de agua en la reducción de las enfermedades transmitidas por ésta depende de la calidad del agua de la fuente, y de cómo se opera y mantiene el sistema de tratamiento.

El siguiente cuadro muestra las relaciones positivas de costo-beneficio, asociadas con la instalación de cloración y el tratamiento de agua convencional para extraer y controlar los agentes patógenos en el agua potable. Se llegó a estas relaciones mediante la comparación de la probabilidad de enfermedades inevitables, para lo cual se usó la diferencia entre las probabilidades de enfermedades sin tratamiento de agua y las de diversos niveles del tratamiento de agua en comunidades con poblaciones de 10.000, 100.000 y 500.000 individuos.

Cuadro 5. Relaciones positivas de costo-beneficio -- tratamiento de agua y remoción de agentes patógenos

POBLACIÓN	10.000	100.000	500.000
(a) Sólo costos de tratamiento			
Buena fuente de agua			
cloración sola	50,2	86,2	98,6
Tratamiento convencional más cloración	18,4	39,5	53,1
Fuente deficiente de agua			
cloración sola	37,6	64,6	73,9
Tratamiento convencional más cloración	17,5	37,5	53,1
(b) Sistemas completos de agua			
Buena fuente de agua			
cloración sola	5,0	8,6	9,9
Tratamiento convencional más cloración	1,8	4,0	5,3
Fuente deficiente de agua			
cloración sola	3,8	6,5	7,4
Tratamiento convencional más cloración	1,8	3,8	5,3
(c) Suposiciones de los peores casos			
Buena fuente de agua			
cloración sola	8,0	13,8	15,8
Tratamiento convencional más cloración	2,9	6,3	8,5
Fuente deficiente de agua			
cloración sola	6,0	10,4	11,8
Tratamiento convencional más cloración	2,8	6,0	8,1

Proporción del beneficio monetario de la enfermedad prevenida con relación al costo del tratamiento de agua potable.

El informe concluyó que los "sistemas municipales de agua diseñados para prevenir las enfermedades infecciosas transmitidas por el agua, son una de las inversiones más eficaces de los fondos públicos que puede realizar la sociedad. Incluso los cálculos moderados en las peores condiciones muestran proporciones de costo-beneficio de 3:1 para sistemas pequeños y 8:1 para sistemas grandes. El agua potable sin agentes patógenos es una ganga".

Considerando la comparación de estos beneficios con los riesgos de cáncer potencial asociados con la desinfección de agua potable, el grupo observó que los costos para prevenir los riesgos carcinogénicos relativamente pequeños no se pueden garantizar, dado que se deben reducir muchos riesgos adicionales de salud pública.

4.1 Riesgos antiguos y recientes de enfermedades transmitidas por agua

Las enfermedades transmitidas por el agua siguen presentando retos para los funcionarios de la salud pública y para las entidades que brindan servicio de agua. Los microorganismos en el agua de grifo que causan enfermedades, provienen generalmente de la deficiente calidad del agua de la fuente, así como de los errores en los procesos de tratamiento de desinfección y filtración o de los sistemas de distribución.

En la mayoría de casos, se dan brotes de enfermedades transmitidas por agua en sistemas hídricos con inadecuada desinfección o sin ella. Sin embargo, han surgido nuevas inquietudes sobre agentes patógenos emergentes como *criptosporidio*, que incluso aparecen en abastecimientos de agua de alta calidad (Craun et al, 1994b).

Los agentes patógenos transmitidos por el agua que causan las enfermedades se agrupan en tres clases generales: bacterias, virus y protozoos parasitarios, cada una con diversas especies identificadas. Las bacterias y virus contaminan las aguas superficiales y las subterráneas, mientras que los protozoos parasitarios aparecen predominantemente en el agua superficial (Tardiff, 1993).

Cuadro 6. Agentes patógenos transmitidos por el agua

Bacterias	Virus	Protozoos
<i>Campylobacter</i>	Norwalk-like	<i>Cryptosporidium parvum</i>
<i>Escherichia coli</i>	Entero (poliomielitis, coxsackie, echo, rotavirus)	<i>Giardia lamblia</i>
<i>Salmonella</i> (no tifoidea)	Hepatitis A	<i>Entamoeba histolytica</i>
<i>Shigella</i>	Rotavirus	
<i>Yersinia</i>		
<i>Vibrio</i> (no cólera)		
<i>Salmonella</i> (tifoidea)		
<i>Vibrio</i> (cólera)		
<i>Legionella</i>		

4.2 **Enfermedades asociadas con agentes patógenos transmitidos por el agua**

Las bacterias y protozoos generalmente inducen a trastornos gastrointestinales con una intensidad muy variable. Las bacterias también causan enfermedades potencialmente mortales como tifoidea y cólera. Los virus causan graves enfermedades como la meningitis aséptica, encefalitis, poliomielitis, hepatitis, miocarditis y diabetes (Payment, 1993). Además, los trastornos gastrointestinales pueden atribuirse a microorganismos no identificados o no especificados. En función de los casos ocurridos en Estados Unidos, las infecciones protozoarias son las más comunes, seguidas de las bacterianas y las virales (Craun, 1996b).

Cuadro 7. Causas de brotes transmitidos por agua en EUA, 1971-92

Causa del brote	Porcentaje de brotes	
	Sistemas hídricos que pertenecen a la comunidad	Sistemas hídricos que no pertenecen a la comunidad
Contaminación del sistema de distribución	29%	7%
Desinfección inadecuada del agua superficial sin filtro	24%	8%
Desinfección inadecuada de aguas subterráneas	14%	30%
Aguas subterráneas sin tratar	11%	42%
Filtración inadecuada del agua superficial	11%	1%
Asuntos varios; causas desconocidas	5%	6%
Alimentación inadecuada de químicos	3%	1%
Agua superficial sin tratar	2%	5%
Filtración inadecuada de aguas subterráneas	1%	0
TOTAL	100%	100%

Craun también comparó los brotes con las fuentes de agua y las técnicas de tratamiento en los sistemas de agua de la comunidad. Para los sistemas en los que se empleaba agua superficial, se identificó a la contaminación de fuentes y deficiencias de tratamiento como los principales agentes causales de los brotes. Las aguas subterráneas sin tratar o inadecuadamente tratadas eran responsables del 10 a 14 por ciento de los brotes desde 1971 a 1992. Durante todo el período, las aguas subterráneas contaminadas, sin tratar e inadecuadamente tratadas, eran responsables de más brotes que el agua superficial contaminada.

5. El debate de los subproductos de desinfección

Durante casi 25 años, la política de reglamentación de agua potable en los Estados Unidos se ha centrado principalmente en mitigar los riesgos potenciales para la salud, asociados con contaminantes químicos en abastecimientos de agua potable. Este énfasis en contaminantes químicos lo causó una falsa creencia de que las amenazas microbiológicas se encontraban en gran parte bajo control y, hasta cierto punto, existía una “fobia química”.

En 1974, los científicos de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) determinaron que el cloro reacciona con ciertos materiales orgánicos durante la desinfección de agua para crear trihalometanos (THM), incluido en particular el cloroformo, con cantidades menores de otros THM. Los estudios toxicológicos emprendidos en cloroformo indicaron que era carcinogénico para animales de laboratorio, aunque en niveles mucho mayores que los encontrados en agua potable. Los temores de que los THM podrían ser un carcinógeno humano potencial, llevaron a la EPA a fijar los límites reglamentarios para estos subproductos de desinfección (SPD) a 100 partes por mil millones (ppmm) para sistemas que servían a más de 10.000 personas. En Estados Unidos, sin embargo, todavía no hay normas de exigencia para subproductos de desinfección en sistemas pequeños.

En 1994, la EPA propuso el estadio I de una regla de subproductos de desinfectantes/desinfección. Esta regla reduciría el máximo nivel de contaminantes (MNC) para SPD y ampliaría la cobertura a sistemas pequeños. La EPA recomendó revisar esta regla propuesta en noviembre de 1997. Estas revisiones se basaron en un convenio entre los miembros de un Comité Federal Asesor que incluía a representantes de servicios de agua, Consejo de Química de Cloro, funcionarios de salud pública, ambientalistas y otros grupos involucrados. La meta del nuevo estadio I de la regla de subproductos de desinfección es reducir los niveles de SPD en el agua potable, sin comprometer la protección microbiana. La regla ordena un proceso llamado coagulación mejorada para eliminar los precursores de SPD. La propuesta también coloca a los nuevos MNC para THM totales a 80 ppmm, ácidos haloacéticos a 60 ppmm y bromato a 10 ppmm. El Comité Federal Asesor fue cauteloso al promover el uso de otros desinfectantes que producirían subproductos

desconocidos. El Comité también fue muy cuidadoso en cuanto a cualquier cambio que pudiese alentar a los servicios de agua a reducir el nivel de desinfección actualmente practicada. Existía un acuerdo generalizado entre los miembros del grupo en cuanto a que no se debe permitir el aumento de los riesgos de microbios patógenos en el agua potable. Esta regla propuesta finalizará en noviembre de 1998.

5.1 Riesgo de cloroformo menor de lo esperado

Al finalizar la regla en estadio I de SPD, la EPA ha examinado la base científica para esta regla. El 31 de marzo de 1998, la EPA publicó un Aviso sobre la Disponibilidad de Datos de Desinfectantes y Subproductos de Desinfección. Este aviso propuso cambios en las metas máximas de niveles de contaminantes (MMNC) para SPD basados en las nuevas investigaciones recientemente disponibles. La EPA coloca al MMNC en un nivel en el que se esperan efectos adversos no conocidos o previstos sobre la salud, y que permite un margen adecuado de seguridad. El aumento del MMNC para cloroformo de 0 a 300 ppm fue el cambio más importante que repercutió en el cloro según este aviso. Al proponer este cambio, la EPA siguió las recomendaciones de un panel de expertos convocado por el Instituto Internacional de Ciencias de la Vida. El panel de expertos concluyó que el cloroformo tenía probabilidad de “ser un carcinógeno por encima de una cierta variedad de dosis, pero poca probabilidad de ser carcinogénico bajo cierta dosis” (ILSI, 1997).

Otros grupos también han examinado los datos sobre SPD y cáncer. En 1990, la Agencia Internacional de Investigación del Cáncer (AIIC) convocó un taller de expertos para evaluar la posible carcinogenicidad del agua potable clorada. La AIIC es una división de investigación de la Organización Mundial de la Salud, y regularmente evalúa la carcinogenicidad humana de diferentes materiales. El grupo de trabajo de la AIIC evaluó los principales análisis científicos disponibles de los efectos potenciales del agua potable clorada sobre la salud. Concluyeron que el agua potable clorada **no es un carcinógeno humano clasificable** (AIIC, 1991).

El Programa Nacional de Toxicología (PNT) del Departamento de Salud y Servicios Sociales de los Estados Unidos llegó a una conclusión similar en 1990. El estudio del PNT examinó la carcinogenicidad del agua clorada en ratas y ratones de laboratorio. Es importante señalar que el agua empleada en este estudio fue clorada muy por encima de los niveles de cloración encontrados en abastecimientos públicos de agua. Los resultados del estudio del PNT informaron que no había pruebas sobre la actividad carcinogénica por el consumo de agua clorada en ratones machos y hembras o ratas machos. Las pruebas equívocas de la actividad carcinogénica se observaron en las ratas hembras (PNT, 1990).

Actualmente, no son concluyentes los estudios sobre si causan cáncer los subproductos de desinfección de cloro. Además de las inquietudes por el cáncer, los nuevos estudios se han centrado en los abortos y efectos del desarrollo de

SPD. Un estudio reciente del Departamento de California sobre Servicios de Salud informó acerca de un alto riesgo de aborto en mujeres que bebieron agua del grifo con altos niveles de SPD. Sin embargo, cuando las tres comunidades estudiadas se analizaron por separado, este resultado fue estadísticamente significativo en sólo una de las tres comunidades. No es claro que los abortos estuvieran relacionados causalmente con la cloración de alguna manera. Además se debe profundizar la investigación.

5.2 Riesgos comparativos: microbianos frente a contaminantes químicos

La tarea de los reguladores es maximizar la protección de la salud pública, mediante la administración de los riesgos relativos para la salud humana de los contaminantes microbiológicos y químicos en el agua potable. La continua evidencia de aparición de enfermedades transmitidas por agua, indica que los riesgos microbianos deben recibir mucha mayor atención que los SPD. Por este motivo, la Academia Americana de Microbiología ha recomendado que “los riesgos para la salud suscitados por los agentes patógenos microbianos se deben colocar como prioridad en el tratamiento de agua para proteger la salud pública” (Ford y Colwell, 1996). Además, el personal de la EPA ha observado que los riesgos de enfermedad microbiana del agua potable no desinfectada son de 100 a 1.000 veces mayor que los riesgos planteados por los SPD (Regli, 1993).

En 1993, en un estudio presentado a la EPA por el Instituto de Cloro durante el curso de las primeras negociaciones sobre la regla del SPD, el Dr. Robert Tardiff presentó los resultados de la aplicación de cinco criterios esenciales para determinar los riesgos comparativos de la salud de contaminación microbiana y química. Los cinco criterios para evaluar las enfermedades relacionadas con el agua son: 1) tipos, 2) incidencia, 3) intensidad, 4) latencia y 5) certidumbre de la ocurrencia (Tardiff, 1993).

El informe del Dr. Tardiff concluyó que el riesgo de las enfermedades microbianas es mucho mayor que el presentado por productos químicos potencialmente cancerígenos en los seres humanos. Es importante señalar que hay diferencias significativas en la incidencia de enfermedades, la cantidad de tiempo (latencia) entre la exposición y enfermedad clínica y la certeza de enfermedad de muchas personas. Comparado con los riesgos químicos, los riesgos microbianos son mucho mayores (1.000 a 100.000 veces), su latencia es mucho menor (días contra decenios) y es casi un hecho que causarán enfermedades en los seres humanos.

Un informe publicado en 1994 por la Sociedad Internacional de Legislación de Toxicología y Farmacología declaró que “la reducción de la mortalidad debido a enfermedades infecciosas transmitidas por agua, atribuida en gran parte a la cloración de abastecimientos de agua potable, parece exceder cualquier riesgo de cáncer teórico (tan bajo como 0) presentado por las cantidades de minutos de

productos químicos orgánicos clorados que se encontraron en las aguas potables desinfectadas con cloro” (Coulston y Kolbye, 1994).

Este criterio es apoyado por la Academia Americana de Microbiología: “Es importante indicar que no hay pruebas directas y definitivas que señalen que los subproductos de desinfección afecten la salud de los seres humanos en concentraciones encontradas en el agua potable ... No se debe permitir que las preocupaciones sobre la toxicología de los SPD comprometan la exitosa desinfección del agua potable, sin contar por lo menos con datos que refuercen tales decisiones”. (Ford y Colwell, 1996)

Aunque gran parte de la atención de la investigación se ha centrado en los SPD del cloro, también producen subproductos otros químicos desinfectantes cuando reaccionan con sustancias orgánicas y otros precursores en el agua sin tratar. El bromato, por ejemplo, es principalmente un subproducto de la ozonización de aguas con alto contenido de bromuro. La EPA está reglamentando el bromato en la regla del estadio I.

5.3 Control de subproductos de desinfección

Mantener una desinfección adecuada es una necesidad absoluta. Pero también se pueden realizar algunas acciones para reducir los niveles de SPD sin comprometer la protección microbiana. La capacidad de las plantas de tratamiento para reducir los SPD depende de algún modo de la economía. Si no hay recursos disponibles para reducir los SPD, la planta de tratamiento debe seguir desinfectando adecuadamente el agua.

Los entes que suministran agua pueden emplear técnicas de tratamiento que maximicen la seguridad y calidad del agua potable mientras se minimiza el riesgo de formación del SPD. Uno de los mejores métodos para controlar los SPD de cualquier proceso de desinfección es eliminar los precursores orgánicos antes de la desinfección. Otros métodos convencionales incluyen el cambio del punto de cloración, usando cloramina en el sistema de distribución y disminuyendo la tasa de alimentación de cloro, aunque esto pueda conducir a aumentos inadmisibles del riesgo microbiano. Un informe del Comité de Calidad del Agua de la American Water Works Association (AWWA) identificó procedimientos eficaces para reducir la formación de trihalometanos (THM) de la siguiente manera (AWWA, 1991):

5.3.1 *Remoción del precursor orgánico*

Hay tres maneras de eliminar eficazmente los precursores orgánicos:

Coagulación y clarificación

La mayoría de las plantas de tratamiento optimizan su proceso de coagulación para remover la turbiedad (partículas). Sin embargo, se pueden optimizar los procesos de coagulación para remover naturalmente las sustancias orgánicas. Los precursores se eliminan cuando el alumbre o sales de hierro se usan como coagulantes para el control de turbiedad. La remoción adicional de precursores se logra generalmente al reducir el pH antes de o durante el agregado de estos coagulantes.

Adsorción

Los procesos de adsorción se han usado con éxito en algunas aplicaciones para extraer el material de desinfección del precursor del subproducto. El carbono activado puede proporcionar adsorción. Se ha realizado una significativa investigación para determinar la capacidad disponible de carbono activado para las sustancias orgánicas disueltas y para los micro-contaminantes específicos. Tanto el carbono activado granular como el carbono activado en polvo cumplen esta función.

Tecnología de membrana

Las membranas se han usado desde hace mucho para desalinar las aguas salobres. El proceso usa la presión hidráulica para forzar al líquido a pasar a través de una membrana semipermeable. Se ha demostrado que con esta tecnología se remueven con éxito los precursores de THM. En el informe de la AWWA se señala que los procedimientos de la membrana “eliminan efectivamente los precursores del producto finalizado (agua potable), lo que la convierte en una opción prometedora para el control futuro de THM y otros subproductos de desinfección”.

Muchas de estas tecnologías pueden tener un costo excesivo en los países en desarrollo. Si ese es el caso, es imperativo recalcar la importancia de mantener una desinfección adecuada.

5.4 ***Procesos de tratamientos alternativos***

Las opciones de cloración se han estudiado a lo largo de la historia del tratamiento de agua, durante la cual se propusieron diversos métodos de desinfección. Algunas técnicas de tratamiento son de carácter dudoso en el tratamiento de agua potable. Los estudios realizados por Richard J. Bull, W.P. Heffernan y otros indicaron que los desinfectantes alternativos también produjeron una serie de subproductos.

Estos resultados demostraron que en todos los métodos conocidos (con la posible excepción de la radiación ultravioleta) de desinfección de agua potable se incluye el uso de productos químicos reactivos y, como tal, dan lugar a la formación de subproductos (Bull y Kopfler, 1991).

La industria del agua ha venido evaluando diversas alternativas para desinfectantes con contenido de cloro. Cada opción tiene sus ventajas, y desventajas, todo se debe evaluar sobre la base de riesgos, incertidumbres y beneficios. Esto es especialmente importante si se considera la limitada experiencia y conocimiento científico asociado con estos procesos. En comparación con la cloración, se conoce relativamente poco de los subproductos potenciales de desinfectantes alternativos.

Las ventajas y desventajas conocidas, asociadas con los procedimientos basados en cloro y desinfección alternativa se describen a continuación (White, 1986):

5.4.1 Desinfectantes con contenido de cloro

Cloraminas

En este proceso se agrega amoníaco y compuestos de cloro a una planta de filtración de agua. Cuando se controla adecuadamente, la mezcla forma cloraminas. Éstas se usan comúnmente para mantener un residuo en el tratamiento de distribución del sistema posterior con un desinfectante más potente, como el cloro libre.

Ventajas de la cloramina

- Residuo persistente
- Minimización de sabores y olores
- Niveles inferiores de la formación de THM y ácido haloacético (AHA)
- Desinfección eficaz de biopelículas en el sistema de distribución

Desventajas de la cloramina

- Produce subproductos de desinfección, incluidos los compuestos basados en nitrógeno, así como el hidrato de cloral que se puede reglamentar como un SPD en el futuro. Hay escasa información sobre la toxicidad de los subproductos de desinfección de cloramina. En un análisis de los efectos sobre la salud de las opciones, Bull sostiene que “existe poca información sobre la cual basar un cálculo del riesgo para la salud que plantea la cloramina” (Bull y Kopfler, 1991).
- Presenta problemas a los individuos en las máquinas de diálisis. Los residuos de cloramina en el agua del grifo pueden pasar por membranas en

las máquinas de diálisis e inducir directamente el daño oxidante a los eritrocitos.

- Causa irritación en los ojos. La exposición a altos niveles de cloramina puede irritar los ojos.
- Requiere mayor dosificación y tiempo de contacto (valores mayores de TC, por ejemplo, el tiempo de concentración x).
- Tiene valores dudosos, como germicida viral y parasitario.
- Puede promover el crecimiento de algas en reservorios y el aumento en bacterias del sistema de distribución debidas al amoníaco residual.
- Puede producir altos niveles de AHA.
- Proporciona capacidades más débiles de oxidación y desinfección que el cloro libre.

Dióxido de cloro (ClO₂)

El dióxido de cloro se genera en las instalaciones de tratamiento de agua. La popularidad del dióxido de cloro como un desinfectante de agua aumentó en los años setenta cuando se descubrió que no promovió la formación de THM.

Ventajas del dióxido de cloro

- Actúa como una excelente sustancia virucida.
- No reacciona con nitrógeno amoniacal para formar aminas cloradas.
- No reacciona con material oxidable para formar THM; destruye hasta 30% de los precursores del THM.
- Destruye los fenoles que causan problemas de gusto y olor en los abastecimientos de agua potable.
- Forma pocos SPD clorados, como THM o AHA.
- Desinfecta y oxida eficazmente, incluyendo la buena desinfección tanto de *Giardia* como *Cryptosporidio*.
- Obras de dosificación baja en el paso de posdesinfección sin necesidad de repetidores.
- Mejora la remoción del hierro y manganeso por oxidación y sedimentación rápida de compuestos oxidados.
- No reacciona con bromuro para formar bromato o subproductos del bromo.

Desventajas del dióxido de cloro

- Se descompone en subproductos inorgánicos. El dióxido de cloro se descompone en clorito y en menor grado en ion de clorato.
- Requiere equipo de generación y manejo de productos químicos en el lugar.
- Ocasionalmente plantea problemas de olor y sabor.

5.4.2 Desinfectantes alternativos

Ozono

Durante varios decenios, en Europa se ha usado el ozono para el control del sabor y olor, así como para la remoción de colores y desinfección.

Ventajas del ozono

- Actúa como una excelente sustancia virucida.
- Desinfecta y oxida muy eficazmente.
- No produce ningún THM, AHA u otros subproductos clorados.
- Mejora la remoción de turbiedad bajo ciertas condiciones.
- Desactiva tanto al *Criptosporidio* como al *Giardia*, así como a otros agentes patógenos conocidos.
- Controla el sabor y olor.

Desventajas del ozono

- Produce subproductos de desinfección que incluyen:
 - Aldehídos
 - Cetonas
 - Ácidos carboxílicos
 - THM de bromo incluido el bromoformo
 - Ácidos Acéticos de bromo
 - Bromato
 - Quinonas
 - Peróxidos
- Fomenta la formación de THM cuando se combinan algunos subproductos de ozonización con procesos secundarios de desinfección. Se necesitará un filtro biológicamente activado para eliminar estos precursores recién formados.
- No proporciona un residuo persistente.
- Plantea inquietudes reglamentarias. En los reglamentos futuros de subproductos de desinfección, se puede contemplar la necesidad de contar con plantas que usen ozono para instalar los costosos sistemas de remoción de precursores (como sistemas granulares de filtración de carbono activado).
- Requiere inversión de capital. El ozono se debe producir en el lugar por medio de una tecnología costosa que requiere un alto nivel de mantenimiento y capacitación substancial de operadores.
- Promueve el crecimiento microbiano. El ozono reacciona fácilmente con la materia orgánica más compleja y puede descomponerla en compuestos más pequeños que sirven para aumentar los nutrientes en los abastecimientos de agua, por lo tanto mejora el nuevo crecimiento microbiano en los sistemas de distribución de agua.

Radiación ultravioleta (UV)

Este proceso incluye la exposición del agua a la radiación UV que desactiva diversos microorganismos. La técnica se ha aplicado cada vez más para el tratamiento de aguas residuales, pero su aplicación ha sido muy limitada en el tratamiento de agua potable.

Ventajas de la radiación ultravioleta

- No requiere almacenamiento químico, manejo o equipo de alimentación.
- No requiere subproductos identificados de desinfección.

Desventajas de la radiación ultravioleta

- No hay acción residual
- Requisitos altos de mantenimiento
- Elevados costos de capital inicial
- Elevados costos operativos (energía)
- La acción de desinfección puede estar comprometida por variables tales como la claridad del agua, dureza (escalonamiento en los tubos UV), longitud de las ondas de radiación UV o falta de energía.

Cuadro 8. Desinfectantes de agua potable a simple vista

Desinfectantes	Eficacia de desinfección	Mantenimiento de residuos	Estado de información en la química del subproducto	Remoción de colores	Remoción de olores comunes
Cloro	Bueno	Bueno	Adecuado	Bueno	Bueno
Cloraminas	Pobre	Bueno	Limitado	Inadmisib e	Pobre
Dióxido de cloro	Bueno	Inadmisible	Adecuado	Bueno	Bueno
Ozono	Excelente	Inadmisible	Limitado	Excelente	Excelente
Radiación Ultravioleta	Acertado	Inadmisible	Nulo	N/A	N/A

Fuente: Trussell, R. Rhodes, *Control Strategy 1: Alternative Oxidants and Disinfectants*. 1991.

5.4.3 Factores desconocidos asociados con las opciones

Es limitada la investigación científica del riesgo asociado con desinfectantes alternativos y subproductos de desinfección alternativa. La decisión de cambiar de cloración a las instalaciones de agua podría ser peligrosa porque los científicos saben muy poco acerca de los subproductos de desinfección de procesos diferentes a la cloración.

El doctor Richard Bull observó en su análisis sobre los efectos de desinfectantes y subproductos de desinfección en la salud que “el acto más irresponsable sería saltar a opciones no probadas debido a los riesgos percibidos con tecnologías presentes que apenas están empezando a comprenderse” (Bull y Kopfler, 1991).

La EPA reconoció durante el desarrollo de reglamentos sobre subproductos desinfectantes y de desinfección que “nosotros [la EPA] actualmente no comprendemos bien los subproductos formados de desinfectantes alternativos, como tampoco algunos de sus riesgos asociados a la salud” (US EPA, 1991).

La determinación de los riesgos a la salud asociados con desinfectantes y subproductos de desinfección, requiere una investigación adicional especialmente centrada en las principales opciones de desinfección. Según William H. Glaze et al (incluido el doctor Bull), se necesita investigar para: (1) evaluar los riesgos toxicológicos relativos de los desinfectantes y sus subproductos y (2) desarrollar modelos con base biológica para las relaciones de dosis y respuesta de estos productos químicos (Glaze et al, 1993).

6. El futuro de la desinfección de cloro

El debate de subproductos de desinfección ha llevado a algunas personas a pensar que disminuirá el uso de cloro en el tratamiento de agua potable. Esto es altamente improbable. Los desinfectantes alternativos también crean subproductos. Hay otras maneras más apropiadas de reducir los subproductos de desinfección, como las tecnologías de remoción de precursores.

Además, el cloro es el desinfectante preferido para el agua potable por varias razones. Cualquier otro tipo de desinfectante no puede proporcionar la amplia variedad de beneficios del cloro. Los desinfectantes que contienen cloro proporcionan el residuo más eficaz y confiable en los sistemas de distribución. Este residuo es una parte importante del enfoque multibarrera para prevenir las enfermedades transmitidas por el agua.

Según la Organización Mundial de la Salud, la **desinfección con cloro es aún la mejor garantía del agua microbiológicamente potable** (Oficina Regional de la OMS para Europa, *Drinking Water Disinfection*). No hay muchas probabilidades de que esto cambie en un futuro próximo.

7. Referencias

- American Water Works Association. Water Quality Disinfection Committee. *State of the Art Report*. Denver. 1991.

- American Water Works Association. Water Quality Disinfection Committee. Survey of Water Utility Disinfection Practices. *Journal AWWA*. Septiembre de 1992: 121-128.
- Bull, R.J. y Kopfler, F.C. *Health Effects of Disinfectants and Disinfection By-products*. AWWA Research Foundation. Denver. 1991.
- Coulston, F. y Kolbye, A., Eds. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*., 1994, vol 20, (1, parte 2): S424-428.
- Craun, G.F. y contribuyentes múltiples. En: *Water Quality in Latin America: Balancing the Microbial and Chemical Risks in Drinking Water Disinfection*. Regional Symposium on Water Quality, Argentina, 1994. Washington, D.C.: International Life Sciences Institute; 1996.
- Craun, G.F. Waterborne Disease in the United States. *Water Quality in Latin America*. Pan American Health Organization. Washington, D.C.; 1996: 55-77.
- Craun, G.F., Bull, R.J., Clark, R.M., Doull, J., Grabow, W., Marsh, G.M., Okun, D.A., Regli, S., Sobsey, M.D. y Symons, J.M. Balancing Chemical and Microbial Risks of Drinking Water Disinfection, Part I, Benefits and Potencial Risks. *J Water SRT—Agua*, 1994; 43 (4): 192-199.
- Craun, G.F., Bull, R.J., Clark, R.M., Doull, J., Grabow, W., Marsh, G.M., Okun, D.A., Regli, S., Sobsey, M.D. y Symons, J.M. Balancing Chemical and Microbial Risks of Drinking Water Disinfection, Part II, Managing the Risks. *J Water SRT—Agua*, 1994; 43 (5): 207-218.
- Ford, T.E. y Colwell, R.R. *A Global Decline in Microbiological Safety of Water: A Call for Action*. American Academy of Microbiology. Washington. 1996.
- Glaze, W.H., Andelman, J.B., Bull, R.J., Conolly, R.B., Hertz, C.D., Hood, R.D. y Pegram, R.A. Determining Health Risks Associated with Disinfectants and Disinfection By-products: Research Needs. *Management and Operations, Journal AWWA*, 1993.
- International Agency for Research on Cancer (World Health Organization). Chlorinated Drinking Water; Chlorination By-products; Some Other Halogenated Compounds; Cobalt and Cobalt Compounds. *IARC Monograph on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans*. 1991.
- International Life Sciences Institute. An Evaluation of EPA's Proposed Guidelines for Carcinogen Risk Assessment Using Chloroform and

Dichloroacetate as Case Studies. *Report of an Expert Panel*. Noviembre de 1997.

- Morris, J.C. Aqueous Chlorine in the Treatment of Water Supplies. Cambridge: Harvard University, 1985.
- National Toxicology Program, U.S. Department of Health & Human Services. Technical Report on the Toxicology and Carcinogenesis of Chlorinated and Chloraminated Water in F344/N Rats and B6C3F1 Mice. 1990.
- No. 46, 1829-Water Purification. Edición *Life Millenium*, octubre de 1997.
- Payment, P. Viruses: Prevalence of Disease, Levels, and Sources. En: *Safety of Water Disinfection: Balancing Chemical & Microbial Risks*, First International Conference on the Safety of Water Disinfection, Washington, DC, 1992. Washington: International Life Sciences Institute;1993: 99-113.
- Regli, S., Berger, P., Macler, B. y Haas, C. Proposed Decision Tree for Management of Risks in Drinking Water: Consideration for Health and Socioeconomic Factors. En: *Safety of Water Disinfection: Balancing Chemical & Microbial Risks*, First International Conference on the Safety of Water Disinfection, Washington, DC, 1992. Washington: International Life Sciences Institute; 1993: 39-80.
- Tardiff, R.G. *Balancing Risks from Chemical Carcinogens & Waterborne Infectious Microbes: A Conceptual Framework*. Report prepared for US EPA Advisory Committee to Negotiate the disinfection By-products Rule. Washington, DC: 1993.
- Trussell, R.R. *Control Strategy 1: Alternative Oxidants and Disinfectants*. Presentation at the 98th Annual American Water Works Association Conference. 1991.
- US Environmental Protection Agency. *Status Report on Development of Regulations for Disinfectants and Disinfection By-products*. Washington, DC: 1991.
- White, G.C. *The Handbook of Chlorination*, 2nd Ed. Nueva York: Von Norstrand Reinhold, 1986.