



**FACULTAD DE FARMACIA
UNIVERSIDAD COMPLUTENSE**

TRABAJO FIN DE GRADO

TÍTULO:

**CLORACIÓN FRENTE A OZONIZACIÓN EN EL
TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE. VENTAJAS Y
DESVENTAJAS DE AMBOS PROCESOS**

Autor: María del Barrio de Vergara

D.N.I.: 53733488Z

Tutora: África Martínez Alonso

Convocatoria: Junio - 2015

ÍNDICE

<u>1. RESUMEN.....</u>	<u>1</u>
<u>2. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES.....</u>	<u>1</u>
<u>3. OBJETIVOS.....</u>	<u>3</u>
<u>4. METODOLOGÍA.....</u>	<u>3</u>
4.1 Criterios sanitarios de la calidad de aguas de consumo.....	3
4.2 Desinfección del agua potable.....	5
4.2.1. Selección del desinfectante primario o principal.....	7
4.2.2 Selección del desinfectante residual o secundario.....	7
<u>5. RESULTADOS.....</u>	<u>7</u>
5.1. Desinfección por cloración.....	8
5.2. Desinfección por dióxido de cloro.....	10
5.3. Desinfección por cloroaminas.	10
5.4. Subproductos de la desinfección por cloración.....	11
5.4.1. Subproductos mayoritarios de la cloración.....	12
5.4.2. Subproductos minoritarios de la cloración.....	14
5.5. Subproductos de la desinfección por dióxido de cloro y cloroaminas.....	14
5.6. Desinfección con ozono: Ozonización.....	14
5.6.1. Subproductos de la desinfección por ozonización.....	17
<u>6. DISCUSIÓN.....</u>	<u>17</u>
6.1. Ventajas y desventajas de la cloración frente a la ozonización	17
<u>7. CONCLUSIONES.....</u>	<u>19</u>
<u>8. BIBLIOGRAFÍA.....</u>	<u>20</u>

1. RESUMEN

En este trabajo se realiza una revisión de los diferentes productos químicos utilizados en la desinfección del agua potable. Se describe el fundamento de los métodos de desinfección así como los factores que determinan la formación y la presencia de subproductos en el proceso de desinfección y se presentan aspectos normativos para estos contaminantes que pueden ser potencialmente peligrosos para la salud humana. Se discuten finalmente las ventajas e inconvenientes de la cloración frente a la ozonización al ser los dos métodos de desinfección más empleados actualmente.

2. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

La disponibilidad de agua apta para el consumo es una de las prioridades de toda sociedad humana. No solo es importante la cantidad para cubrir las necesidades básicas, además el agua debe tener la calidad que garantice su inocuidad para la salud. Es ampliamente conocido el hecho de que las grandes epidemias de la humanidad han venido por la vía de la contaminación del agua.

Uno de los primeros tratamientos llevados a cabo para tratar de evitar las enfermedades infecciosas transmitidas por el agua fue la sedimentación y la filtración, que disminuyen la carga microbiana pero no garantizan la desinfección total. En 1850 Jhon Snow después de un ataque de cólera en Londres, implementó un sistema de desinfección por cloro para una fuente de abastecimiento en esta ciudad. En 1897 Sims Wooddhead con los antecedentes de Snow y tratando de dar respuesta a una epidemia tifoidea en Kent, Inglaterra, también empleó cloro líquido para paliar los estragos de la enfermedad. Los éxitos de estas experiencias hicieron que en Inglaterra se empleara la cloración como una medida preventiva de contaminación microbiológica del agua y posteriormente en 1908 en New Jersey en Estados Unidos se implementó la cloración como un proceso de tratamiento en la potabilización del agua.

La desinfección del agua, y más concretamente la cloración, ha sido uno de los más importantes logros en la protección de la Salud Pública. Se considera a la filtración y cloración del agua potable como “probablemente el más significativo progreso en salud pública del milenio”.

El uso como desinfectantes del agua de otro tipo de oxidantes diferentes al cloro ha sido estudiado y actualmente se tienen otras alternativas diferentes a la cloración como

método de desinfección. El ozono es conocido desde hace más de 130 años como una especie química empleándose a principios del siglo XX en Francia para el tratamiento del agua. Durante el siglo XX su uso se extendió en Estados Unidos, Canadá, muchas ciudades de Francia, Suiza, Inglaterra y Alemania.

Aunque en la actualidad países que cuentan con una buena infraestructura en sanidad y tratamiento de aguas son muy esporádicos los casos de brotes infecciosos por consumo de aguas infectadas, en los países subdesarrollados las tasas de morbilidad y mortandad por aguas contaminadas con microorganismos patógenos son aún muy altas y causan millones de víctimas cada año.

Según datos de la Organización Mundial de Salud (OMS), hasta 1990, las enfermedades relacionadas con el agua, se encuentran entre las tres causas principales de muerte en el mundo.

Los microorganismos patógenos que se encuentran con mayor frecuencia en el agua no tratada y las enfermedades asociadas a ellos son los siguientes:

Bacterias: gastroenteritis, leptospirosis, fiebre tifoidea, salmonelosis y cólera.

Protozoos: balantidiasis, cryptosporidiasis, disentería amoébrica, giardiasis y ascariasis.

Virus: gastroenteritis, anomalías del corazón, meningitis y hepatitis de tipo infeccioso

Cada año, casi 1.500 millones de personas padecen enfermedades evitables propagadas por el agua, tales como cólera, fiebre tifoidea, disentería, giardiasis, esquitomatosis y hepatitis A. La OMS calcula que más de nueve millones de personas mueren cada año en el mundo a causa de agua contaminada, lo que equivale a 25.000 personas por día, muchas de las cuales son niños menores de cinco años de edad. La ONU proyecta que para el año 2025, más de dos tercios de la población mundial vivirán en países con serios problemas de carencia de suministros de agua limpia. La calidad de agua de consumo humano sigue siendo una prioridad en salud pública.

Desde mediados del siglo XX se ha producido un gran desarrollo en el campo del tratamiento de aguas y una creciente comprensión de nuevos efectos sobre la salud. Garantizar en el agua bajos niveles de compuestos orgánicos, libres de coliformes y de baja turbidez ya no es suficiente. Nuevas informaciones relativas a contaminantes orgánicos e inorgánicos, la identificación en los suministros de agua de nuevos grupos de microorganismos patógenos (Legionella, Crystosporidiium, Giardia), la

identificación en el agua de agentes cancerígenos y teratogénicos como los trihalometanos y los ácidos haloacéticos subproductos de la desinfección con cloro y ozono, están forzando a los suministradores y a la comunidad investigadora a mejorar el control de la calidad del agua dentro de los sistemas de distribución y a buscar nuevas alternativas de tratamiento.

3. OBJETIVOS

Revisión de los métodos químicos utilizados en la desinfección del agua potable. Describir el fundamento de los métodos de desinfección así como los factores que determinan la formación y la presencia de subproductos en la desinfección del agua potable. Discutir finalmente las ventajas e inconvenientes de la cloración frente a la ozonización al ser los dos métodos de desinfección más empleados actualmente.

4. METODOLOGÍA

El estudio de revisión bibliográfica se ha llevado a cabo en dos fases distintas, una primera fase de localización y selección de artículos, con los términos desinfección del agua potable y una segunda fase de evaluación de los trabajos previamente seleccionados.

4.1. Criterios sanitarios de la calidad de aguas de consumo

La Directiva Europea 98/83/CE del Consejo de 3 de noviembre de 1998 relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano no contempla un tratamiento específico de desinfección, ni el mantenimiento de desinfectante residual en la red de distribución del agua para el consumo humano. La Directiva fija unas características microbiológicas mínimas que los distintos países miembros deberán atender, siendo por tanto éstos los que decidirán el empleo o no de desinfectante para cumplir con los valores paramétricos exigibles.

En España la legislación relativa a criterios sanitarios de calidad del agua para consumo humano es la siguiente:

- Real Decreto 140/2003, de 7 de Febrero, “por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano”. Es una transposición de la Directiva 98/83/CE, a la que se añadieron algunos parámetros más y se completa

con un procedimiento de vigilancia sanitaria y normativa técnica sobre potabilización, redes de distribución, materiales de construcción, etc.

- Orden SAS/1915/2009, de 8 de Julio, “sobre sustancias autorizadas para el tratamiento del agua destinada a la producción de agua de consumo humano”; establece que cualquier sustancia o preparado que se añada al agua deberá cumplir la norma UNE-EN vigente en cada momento.

El Real Decreto 140/2003, cuyo objetivo esencial es la protección de la salud humana asegurando el uso adecuado de las sustancias utilizadas en el tratamiento del agua destinada a la producción de consumo humano, establece los criterios sanitarios que deben cumplir las aguas de consumo humano y las instalaciones que permiten su suministro desde la captación hasta el grifo del consumidor y el control de las mismas, garantizando su salubridad, calidad y limpieza, con el fin de proteger la salud de las personas de los efectos adversos derivados de cualquier tipo de contaminación de las aguas.

En dicho Real Decreto se define al Agua de Consumo Humano como todas aquellas aguas ya sea en su estado original, ya sea después del tratamiento, utilizadas para beber, cocinar, preparar alimentos, higiene personal y para otros usos domésticos, sea cual fuere su origen e independientemente de que se suministren al consumidor, a través de redes de distribución, públicas o privadas, de cisternas, de depósitos públicos o privados.

El agua de consumo humano no debe contener ningún tipo de microorganismo, parásito o sustancia, en una cantidad o concentración que pueda suponer un riesgo para la salud humana. Para ello deberá cumplir unos requisitos de calidad y debe cumplir con los criterios especificados en el Anexo I, del citado Real Decreto en el que se detallan los valores paramétricos de tipo microbiológico y químico que debe de cumplir el agua potable.

4.2 Desinfección del agua potable

El objetivo de la desinfección es garantizar la calidad del agua desde el punto de vista microbiológico y asegurar su inocuidad para la salud del consumidor, eliminando los microorganismos patógenos del agua capaces de producir enfermedades.

La desinfección del agua para consumo humano puede ser de tipo químico o físico. La desinfección química aprovecha fundamentalmente la capacidad oxidante de ciertos productos químicos para desarrollar su eficiencia desinfectante mientras que la desinfección física utiliza la aplicación directa de energía, térmica o de radiaciones.

Entre los productos químicos de desinfección más utilizados, se destacan el cloro elemental gaseoso (Cl_2), el hipoclorito (ClO^-), la mezcla de cloro con amoníaco (Cl_2/NH_3) que forman cloroaminas, el dióxido de cloro (ClO_2) y el ozono (O_3).

La selección de un desinfectante químico depende de una serie de condiciones propias de cada sistema de abastecimiento, pero siempre habrá que buscar o tender hacia tres finalidades:

- 1) Proporcionar agua libre de patógenos.
- 2) Evitar la producción de subproductos de la desinfección.
- 3) Mantener una calidad bacteriológica en la red de abastecimiento, evitando los recrecimientos bacterianos.

Para que el tratamiento sea efectivo, el desinfectante utilizado debe poseer ciertas características: Actuar en un tiempo razonable. No ser tóxico en las dosis habituales. No añadir sabores ni olores desagradables al agua. Deben realizar la labor de desinfección a la temperatura del lugar y en un tiempo razonable y en lo posible debe persistir en el agua desinfectada con la concentración suficiente para proporcionar un efecto residual contra la posible contaminación del agua en el sistema de distribución.

El mecanismo de desinfección de los agentes químicos, está basado en que éstos reaccionan con las enzimas esenciales para los procesos metabólicos de las células vivientes (patógenos) destruyéndolas o inactivándolas. En la desinfección química, la eliminación de microorganismos patógenos, objeto de este tratamiento, depende entre otros, de los siguientes factores:

1. Tipo y concentración de los microorganismos que deben destruirse.
 - La reacción de los microorganismos frente a la desinfección depende de la resistencia de sus membranas celulares a la penetración del desinfectante y de la afinidad química del producto con las sustancias vitales del organismo.

2. Tipo y concentración del desinfectante y tiempo de contacto.
 - La destrucción de un microorganismo por un determinado desinfectante es proporcional a la concentración del mismo y al tiempo de reacción (tiempo de contacto). Una concentración baja de desinfectante durante tiempos de contacto largos puede ser suficiente, mientras que si dichos tiempos son más cortos la concentración del desinfectante deberá elevarse para lograr un índice de destrucción semejante
3. Características físico-químicas del agua a tratar.
 - Si existe mucha materia en suspensión los organismos pueden ser inaccesibles al desinfectante.
 - Si el desinfectante es un oxidante, la presencia de materia susceptible de ser oxidada disminuirá la cantidad de desinfectante disponible para destruir a los microorganismos.
 - El pH del agua influye en las reacciones de algunos desinfectantes con el agua, transformándolos en compuestos con muy baja o nula actividad germicida.
 - La temperatura ejerce una marcada influencia sobre el proceso de desinfección. Cuanta más alta sea, más elevado es el índice de destrucción microbiana, sin embargo este efecto se contrarresta en parte por la mayor inestabilidad de los desinfectantes a altas temperaturas.

Existen dos fases en la desinfección:

- ✓ Desinfección primaria: Alcanza el nivel deseado de microorganismos muertos o inactivados y elimina la materia orgánica.
- ✓ Desinfección secundaria: Mantiene un desinfectante residual en el agua tratada que previene que aparezcan patógenos durante la distribución del agua desde que sale de la planta de tratamiento hasta que llega al consumidor.

La mayoría de los desinfectantes producen subproductos de la desinfección, y algunos de ellos cancerígenos. Existe por tanto, un riesgo potencial asociado a la desinfección, pero un riesgo muy bajo comparado con el consumo del agua sin desinfectar.

4.2.1. Selección del desinfectante primario o principal

En la selección del desinfectante primario es fundamental conocer la concentración del carbono orgánico total, ya que una alta concentración del mismo inducirá a un alto potencial en la formación de subproductos y en este caso habrá que seleccionar un desinfectante que no origine subproductos o al menos lo haga en baja cantidad. Por otra parte, es importante conocer también la concentración de bromuros, para descartar en el caso de altas concentraciones de estos, el empleo de fuertes oxidantes, como el ozono, que originarían bromatos como subproducto

4.2.2. Selección del desinfectante residual o secundario

En la selección del desinfectante secundario hay que considerar tres parámetros, que pueden estar realmente o potencialmente presentes en el agua que sale de la planta:

1. Concentración de carbono orgánico asimilable: Generalmente se produce cuando el contenido de carbono orgánico total del agua es elevado y ésta ha sido tratada con un fuerte oxidante empleado como desinfectante principal, como puede ser el caso del ozono.
2. Formación potencial de subproductos de la desinfección: Son los subproductos que se pueden formar en la red de distribución si se emplea cloro.
3. Tiempo de retención en el sistema de distribución.

5. RESULTADOS

En este apartado se presentan los detalles más destacables de los artículos revisados. Se describe el fundamento de los métodos de desinfección así como los factores que determinan la formación y la presencia de subproductos de la desinfección del agua potable y se presentan aspectos normativos para estos contaminantes que pueden ser potencialmente peligrosos para la salud humana.

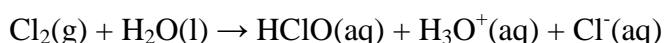
5.1. Desinfección por cloración

La cloración es el procedimiento más extendido en la desinfección de aguas de consumo, que consiste en utilizar cloro gas o sales de cloro, como el hipoclorito de

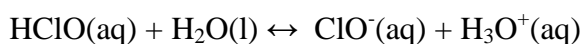
sodio o de calcio. El poder desinfectante del cloro radica en su capacidad de oxidación, que puede considerarse como la capacidad del cloro para reaccionar con otras sustancias y además provee el nivel necesario de concentración residual en el agua tratada para evitar que se produzca una contaminación microbiológica.

En presencia de agua el cloro, bien sea en forma gaseosa (Cl_2), o como hipoclorito, hipocloritos de sodio (NaOCl , 12.5% de cloro disponible) y calcio, ($\text{Ca}(\text{OCl})_2$, 70% de cloro disponible), producen el ácido hipocloroso (HClO) y/o el ion hipoclorito (ClO^-) que son los agentes activos, y su efectividad depende de la cantidad de estas sustancias que el compuesto clorado forme en disolución acuosa.

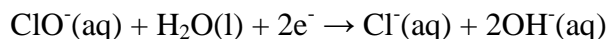
El cloro gas (Cl_2), cuando entra en contacto con el agua se dismuta produciendo ácido hipocloroso, el ácido hipocloroso se ioniza, descomponiéndose en iones hidrógeno e iones hipoclorito según las reacciones:



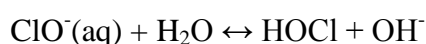
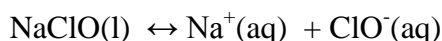
El ácido hipocloroso es un ácido débil que se ioniza dando lugar al anión hipoclorito:



El anión hipoclorito tiene carácter oxidante:



Si el cloro se adiciona como sal del ácido hipocloroso tienen lugar las siguientes reacciones:



Las cualidades desinfectantes tanto el cloro gas como el hipoclorito se ven afectadas de manera muy importante por el pH y por la turbidez del agua. La desinfección es más eficiente con niveles de pH bajos debido a que favorece la formación de ácido hipocloroso que es 80 veces más eficaz que el ion hipoclorito. El ion hipoclorito predomina en un $\text{pH} > 7.5$, mientras que el ácido hipocloroso predomina en un $\text{pH} < 7.5$.

Por otro lado la turbidez del agua tiene mucha importancia en la adición de cloro, en primer lugar porque una turbidez elevada implica una concentración apreciable de materia orgánica u otros elementos y la consiguiente formación de subproductos y porque los patógenos enmascarados con la protección de la materia orgánica son inaccesibles a las moléculas de cloro, sea cual sea la concentración de éste, por lo que la calidad bacteriológica del agua será inadecuada.

El cloro cuando genera hipoclorito y ácido hipocloroso no solo reacciona con las células microbianas, es un agente sumamente activo y reacciona con diferentes materias orgánicas lo que puede dar lugar a la formación de subproductos potencialmente peligrosos para la salud humana.

El hipoclorito sódico junto con el hipoclorito de calcio son los derivados del cloro preferentemente utilizados como alternativa al cloro gaseoso. En la actualidad la mayoría de las plantas potabilizadoras utilizan hipoclorito sódico como agente desinfectante. El hipoclorito de sodio (NaClO) se presenta en forma líquida y es altamente corrosivo. El uso de hipoclorito de sodio es una forma muy conveniente y muy frecuentemente empleada para dosificación de cloro en fuentes pequeñas de suministro de agua potable. El hipoclorito de calcio ($\text{Ca}(\text{ClO})_2$) es una de las formas en las cuales el cloro se encuentra como producto sólido.

La elección del cloro gas o de hipocloritos de sodio o calcio en el proceso de desinfección, depende de las características del abastecimiento y de su eficacia en función de la naturaleza del agua, tiempo de contacto, pH y temperatura.

La práctica de su aplicación, por lo general, consiste en una precloración para oxidar la materia orgánica y disminuir su concentración y una postcloración que garantiza la desinfección y la presencia de cloro en la red de suministro (cloro residual).

Además la cloración también es útil para otros propósitos distintos al de la desinfección, tales como:

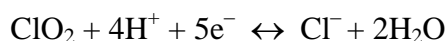
- a) Control del olor y el sabor en el agua
- b) Evita el crecimiento de algas manteniendo limpios los sistemas de tratamiento
- c) Eliminan el hierro y manganeso por precipitación
- d) La oxidación del sulfuro de hidrógeno

El cloro se aplica en exceso de manera que pueda satisfacer la demanda para oxidar estos compuestos y eliminar los microorganismos presentes en el agua, y que así, reste una cantidad de cloro residual en los conductos de agua. Este cloro residual es el cloro libre que queda en el agua después que ha sido desinfectada en la planta. Su utilidad es de continuar desinfectando el agua desde que sale de la planta de tratamiento hasta que llegue al consumidor.

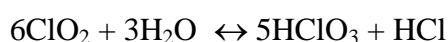
5.2. Desinfección por dióxido de cloro

El poder oxidante del dióxido de cloro, ClO_2 , es mayor que el del cloro, su acción bactericida es muy eficaz en un amplio rango de pH (de 3 a 10). Proporciona un residual en el sistema de abastecimiento. Es bastante inestable por lo que normalmente se genera en el lugar de aplicación.

Actúa como oxidante mediante el par: ClO_2/Cl^-



Se disuelve en agua sin alterarse pero se hidroliza lentamente en un proceso de dismutación a pH neutro o ácido:



en medio alcalino el proceso de dismutación es más rápido

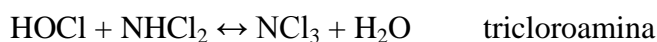
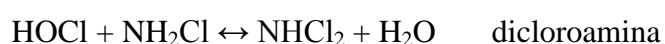
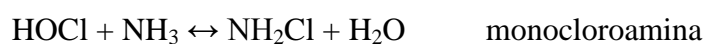


El empleo del dióxido de cloro no está muy extendido, pese a ser un excelente desinfectante, sus elevados costes de instalación y el peligro de aparición de cloritos y cloratos le hacen poco competitivo.

5.3. Desinfección por cloroaminas

La combinación del amoníaco con el cloro en el proceso de tratamiento del agua conocida también como cloración con cloro combinado o cloraminación, tuvo como primer objetivo aportar un desinfectante residual al agua, más persistente que el cloro libre, a la vez que evitar ciertos sabores de algunos compuestos clorados, más recientemente se extendió su empleo debido a una función importante de las cloroaminas y es la de no formar, o al menos formar en menor grado subproductos peligrosos durante el proceso de desinfección.

Las cloroaminas que se forman más frecuentemente son la monocloramina y la dicloroamina:



Tanto las monocloraminas como la dicloroamina tienen un poder desinfectante menor que el ácido hipocloroso, pero en cambio son mucho más estables y por consiguiente su efecto residual es más prolongado. Una de las principales desventajas de la cloroaminación es que estos compuestos al ser más persistentes son más tóxicos a los seres vivos, especialmente a las especies acuáticas y esto unido a su baja capacidad biocida hace que el empleo de la cloroaminación sea casi testimonial.

5.4. Subproductos de la desinfección por cloración

En el proceso de cloración del agua se producen una serie de reacciones químicas entre el cloro utilizado en la desinfección y los compuestos orgánicos presentes en el agua, que se conocen también como ácidos húmicos y ácidos fúlvicos, los cuales se encuentran tanto en el agua superficial como en la profunda y son el producto de la degradación de sustancias vegetales (maderas, tallos, raíces, etc.).

Estos compuestos activos, al entrar en contacto con los derivados del cloro, propician la formación de subproductos de la desinfección, muchos de los cuales se han identificado como potencialmente perjudiciales para la salud humana. Estos compuestos no deseados, sólo se forman si los precursores orgánicos y el cloro residual libre están presentes conjuntamente durante el tiempo suficiente. Una vez formados, es difícil eliminarlos del agua por ello es de suma importancia prevenir su formación.

5.4.1. Subproductos mayoritarios de la cloración

- Trihalometanos (THM)
- Ácidos acéticos halogenados (AAH)

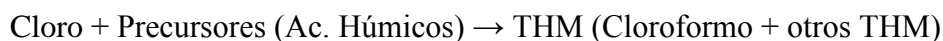
Los THM junto con los AAH son los subproductos más representativos y las especies químicas más comúnmente encontradas en aguas destinadas al consumo humano.

Trihalometanos (THM)

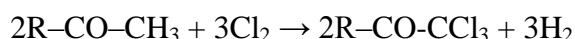
Los THM son compuestos químicos orgánicos, subproductos finales de reacción que se generan durante la desinfección del agua debido a la reacción del cloro con la materia orgánica presente en el agua. Son los subproductos de la cloración que se

forman en mayor concentración y han sido utilizados tradicionalmente como indicadores de la concentración total de subproductos de la cloración.

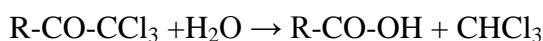
Los THM tienen la fórmula CHX_3 . Se forman a partir de la sustitución de 3 átomos de hidrógeno del metano por átomos de un halógeno (cloro o bromo), de acuerdo con las siguientes reacciones:



Los THM se forman por reacciones entre acetona y cloro. La acetona se oxida a tricloroacetona:



Cuando los valores de pH son altos se puede generar cloroformo por la hidrólisis de la acetona:



Los THM más predominantes son el cloroformo ($CHCl_3$) y el bromodicloroetano ($CHBrCl_2$), con frecuencia también se encuentran el dibromoclorometano ($CHBr_2Cl$) y el bromoformo ($CHBr_3$). Como en la mayoría de los casos se producen conjuntamente, se consideran como un grupo denominado Trihalometanos Totales (THMT). La concentración de THM depende de la presencia de precursores (compuestos activos que pueden reaccionar con el cloro), así como de la dosis de cloro, tiempo de contacto, temperatura del agua y pH. Los valores de THM pueden variar desde menos de 10 $\mu\text{g/L}$ en aguas cloradas de origen subterráneo a más de 200 $\mu\text{g/L}$ en aguas cloradas de origen superficial. La principal propiedad química de los THM es su elevada volatilidad. Los THM pueden incorporarse al cuerpo humano por diversas vías: ingestión de agua del grifo, inhalación de los THM evaporados y absorción dérmica.

Los THM causan daños al hígado, riñones y sistema nervioso central. Los estudios epidemiológicos asocian determinadas exposiciones a THM y en general la exposición a subproductos de la desinfección con efectos sobre la salud como el cáncer de vejiga y determinados defectos de nacimiento en recién nacidos de madres expuestas.

Los estudios sobre el cáncer de vejiga encuentran un incremento del riesgo debido a largas exposiciones a los THM a pesar de que los resultados no son siempre significativos. La Agencia Internacional de Investigaciones sobre el cáncer clasifica el cloroformo y el bromoclorometano como posibles carcinógenos para los humanos en

ciertas condiciones de exposición. El bromoformo y el dibromometano no se han clasificado como cancerígenos.

La OMS establece unos valores guía recomendados (VG) como concentraciones máximas individuales de cada uno de los THM en el agua de consumo humano. Los valores guía representan la concentración de un compuesto que no implica ningún riesgo significativo para la salud a través del consumo durante toda la vida.

- Cloroformo: 300 µg (microgramos)/l
- Bromodichlorometano (BDCM): 60 µg/l
- Dibromoclorometano (DBCM): 100 µg/l
- Bromoformo: 100 µg/l

Según establece la OMS, si se quiere considerar la toxicidad conjunta de los cuatro THM se debe cumplir este requisito:

$$\frac{C_{\text{cloroformo}}}{VG_{\text{cloroformo}}} + \frac{C_{\text{BDCM}}}{VG_{\text{BDCM}}} + \frac{C_{\text{DBCM}}}{VG_{\text{DBCM}}} + \frac{C_{\text{bromoformo}}}{VG_{\text{bromoformo}}} < 1$$

(siendo C la concentración y VG el valor guía)

El Real Decreto 1400/2003 y la normativa europea de criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano fijan una concentración máxima permitida de THM totales (suma de cloroformo, bromodichlorometano, dibromoclorometano y bromoformo) de 100 µg/l. Estos límites legislativos se fijan estableciendo unos márgenes de seguridad que garantizan un elevado grado de protección a la población.

Ácidos acéticos halogenados (AAH)

Los AAH son compuestos no volátiles que pueden encontrarse ocasionalmente en el agua en mayores concentraciones que los THM en función del pH. Cuando el pH es bajo, existe mayor formación de AAH que a mayores pH a los que se forman los THM.

Al igual que los THM, los AAH se forman a partir de la materia orgánica durante la cloración del agua. Los ácidos acéticos halogenados forman un conjunto de 9 compuestos con diferente contenido de cloro y bromo: ácidos cloroacético, dicloroacético, tricloroacético, bromoacético, dibromoacético, tribromoacético,

bromocloroacético, dibromocloroacético y bromodicloroacético. Los productos más abundantes son los que contienen dos cloros y/o bromos.

5.4.2. Subproductos minoritarios de la cloración

Son subproductos de la cloración formados en concentraciones de pocos $\mu\text{g/l}$.

- Acetonitrilos halogenados (dicloroacetonitrilo)
- MX (mutágeno X)
- Hidrato de coral (tricloroacetaldehído)
- Clorofenoles (2-clorofenol, 2,4-diclorofenol y 2,4,6-triclorofenol)
- Otros (haloacetonas, cloropicrina, cloruro y bromuro de cianógeno)

MX (mutágeno X): Con este nombre se conoce la 3-cloro-4-diclorometil-5-hidroxi-2(5H)-furanona. Después de los THM es uno de los subproductos de la cloración más investigados. Generalmente se encuentra en concentraciones muy bajas en las aguas de consumo, del orden de pocos $\mu\text{g/L}$, pero tiene una elevada actividad mutágena.

5.5. Subproductos de la desinfección por dióxido de cloro y cloroaminas

El dióxido de cloro apenas reacciona con la materia orgánica natural del agua, entre ellas los ácidos húmicos y fúlvicos, formando compuestos orgánicos oxidados en muy baja concentración como aldehídos y ácidos carboxílicos, pero apenas genera subproductos halogenados de desinfección, a no ser que junto al dióxido de cloro hubiese presente cloro libre. Su característica oxidante selectiva es la más destacada de este compuesto, por ello su aplicación está indicada en abastecimientos en que las fuentes contienen altas concentraciones de precursores.

Durante el proceso de oxidación, el dióxido de cloro se reduce a ion clorito que es el subproducto más abundante de este compuesto. El ion clorito puede a su vez oxidarse a ion clorato. Sin embargo, existe una cierta incertidumbre de los riesgos que representan para la salud la formación de estos aniones.

En cuanto a las cloroaminas, el cloruro de cianógeno es el subproducto más importante. Esta sustancia es el resultado de las reacciones de precursores orgánicos con el ácido

hipocloroso en presencia del ion amonio. El cloruro de cianógeno, en el organismo humano se metaboliza rápidamente a cianuro que es tóxico.

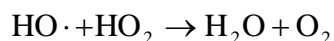
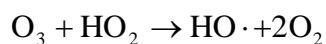
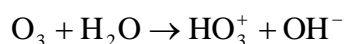
5.6. Desinfección con ozono: Ozonización

El ozono se produce cuando las moléculas de oxígeno son disociadas por medio de una fuente de energía produciendo átomos de oxígeno que posteriormente chocan con una molécula de oxígeno para formar la molécula de ozono (O₃).

El ozono es inestable y se descompone con cierta facilidad en oxígeno (O₂) y oxígeno nascente, que es un fuerte oxidante (O₂[·]). Debido a esta característica, el ozono actúa con gran eficiencia como desinfectante y oxidante. Está comprobada su eficacia en la oxidación de sustancias orgánicas e inorgánicas (entre éstas últimas destacan el hierro y manganeso). Su poder oxidante y desinfectante le hace muy eficaz en la eliminación del olor, sabor y color del agua, así como en la eliminación de bacterias, virus y otros microorganismos, se considera que el ozono es el desinfectante de mayor eficiencia microbicida. Se cree que las bacterias son destruidas debido a la oxidación protoplasmática, dando como resultado la desintegración de la pared de la célula. La eficacia de la desinfección depende de la susceptibilidad de los organismos a ser tratados, del tiempo de contacto y de la concentración de ozono.

El ozono es muy inestable en disolución acuosa. Cuando se descompone en el agua, los radicales libres de peróxido de hidrógeno (HO₂[·]) y del hidróxido (OH[·]) que se forman tienen una gran capacidad de oxidación y desempeñan un papel muy activo en el proceso de desinfección.

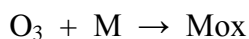
La formación de radicales libres tiene lugar de acuerdo con las siguientes reacciones:



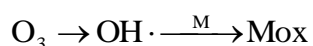
En el agua, la vida del ozono depende de diversas variables, incluyendo el pH, la temperatura, el contenido de carbono orgánico y la concentración de bicarbonatos y carbonatos.

La oxidación de compuestos orgánicos puede tener lugar mediante dos mecanismos distintos:

- a) Mecanismo directo: reacción directa entre el ozono molecular y la sustancia en cuestión:



- b) Mecanismo indirecto: reacción indirecta a través de la auto descomposición del ozono y formación de radicales libres (OH, HO₂) altamente reactivos.



La oxidación directa con el ozono líquido, es relativamente lenta pero la concentración del ozono disuelto es relativamente alta. Por otra parte, la reacción con los radicales hidroxilos es rápida, pero la concentración de hidroxilos bajo condiciones normales de ozonización es relativamente alta.

El pH del agua puede favorecer que las reacciones vayan preferentemente por cada uno de estos dos mecanismos:

- a) La ozonización en medio alcalino aumenta la velocidad de descomposición del ozono incrementando así la velocidad de formación de radicales libres.
- b) En medio ácido se favorece la vía molecular, se inhibe la descomposición del ozono.

El ozono se utiliza en el tratamiento del agua desde hace más de 100 años, y si su empleo en este campo no está más extendido es debido a su mayor costo con respecto a los otros desinfectantes generalmente empleados, sin embargo y debido a las mayores exigencias en las distintas reglamentaciones, especialmente en la reducción de subproductos derivados de la desinfección, está originando un mayor interés en la aplicación de sustancias que originen menos subproductos en el agua, así como una mayor reducción del sabor y olor del agua tratada. El ozono es más potente y de más rápida acción como desinfectante que el cloro, el dióxido de cloro y las cloraminas.

Su principal limitación es su inestabilidad en el agua, su efectividad desaparece a los 30 minutos, mientras el cloro permanece durante 72 horas, por lo que no puede usarse como desinfectante residual en la red de distribución; sin embargo, si es efectivo como desinfectante primario en las plantas de tratamiento de agua.

5.6.1. Subproductos de la desinfección por ozonización

La ozonización es una buena alternativa a la cloración cuando en el agua hay fenoles y otras sustancias orgánicas precursoras de trihalometanos. Los fenoles por la adición de cloro forman clorofenoles de sabor y olor muy desagradables. Sobre estas sustancias orgánicas, con enlaces dobles entre átomos de carbono, actúa el ozono rompiéndolos y a medida que esto sucede, no sólo el olor va desapareciendo, sino que los propios precursores de los trihalometanos se van eliminando, aunque hay que señalar que en ciertos casos en aguas con elevados contenidos de ion bromuro, la ozonización de estas aguas favorece la formación de trihalometanos bromados como resultado de la oxidación del ion Br para formar BrOH. Otros subproductos que se pueden formar por reacción entre el ozono y la materia orgánica son los aldehídos, cetonas y ácidos carboxílicos.

6. DISCUSIÓN

Cada uno de los métodos empleados en el tratamiento del agua potable, como oxidantes/desinfectantes, presentan sus ventajas y desventajas en función de su costo, eficacia, estabilidad facilidad de aplicación y formación de subproductos de la desinfección. El proceso de desinfección más extendido se caracteriza por el empleo de cloro gas y de hipoclorito de sodio (cloración) como desinfectante. Como alternativa, se pueden emplear desinfectantes clorados como el dióxido de cloro o las cloraminas. También se puede emplear ozono como agente oxidante. A continuación se compara la cloración frente a la ozonización resaltando sus ventajas y desventajas

6.1. Ventajas y desventajas de la cloración frente a la ozonización

La evaluación del cloro como desinfectante en su comparación con el ozono presenta las siguientes ventajas:

- a) El cloro y el hipoclorito de sodio son los productos más utilizados en el proceso de desinfección de aguas. La cloración está altamente difundida en los países en desarrollo, dado que constituye la tecnología más conocida por su eficacia, costo de aplicación y por estar histórica y epidemiológicamente comprobada.

- b) En la actualidad la cloración es más eficiente en términos de costo que la desinfección con ozono.
- c) El cloro residual que permanece en el efluente del agua residual puede prolongar el efecto de desinfección aún después del tratamiento inicial.
- d) Oxida fácilmente al hierro, sulfuros y manganeso y reduce en gran medida el olor, sabor y color del agua.
- e) Es muy efectivo para retirar casi todos los agentes patógenos microbianos y es apropiado para ambas desinfección primaria y secundaria (proporciona un residual en el sistema de abastecimiento).
- f) Elimina el amonio, previa transformación en cloramina.

Como desventajas figuran:

- a) La formación de productos halogenados tanto como precursores del agua bruta como en la propia red.
- b) Algunas especies parásitas han mostrado resistencia a dosis bajas de cloro, incluyendo los oocistos de *Cryptosporidium* y los quistes de *Giardia*.
- c) Todas las formas de cloro son muy corrosivas y tóxicas.
- d) Es menos efectivo a pH altos.

La evaluación del ozono como desinfectante en su comparación con el cloro presenta las siguientes ventajas:

- a) La calidad de la desinfección con ozono es muy superior a la que se consigue con cloro debido a su mayor poder oxidante. De esta forma se consiguen eliminar virus, bacterias y microorganismos en general resistentes al cloro.
- b) No produce trihalometanos (en ausencia de bromo) y elimina los precursores de éstos.
- c) Requiere una concentración y tiempo de contacto menor para eliminar bacterias y virus, es más efectivo para la inactivación de *Cryptosporidium* y *Giardia*.
- d) Facilita la eliminación del hierro y manganeso y reduce en gran medida el olor, sabor y color del agua.

Como desventajas figuran:

- a) Su mayor coste, tanto en los equipos como en los costes de operación (energía eléctrica) a pesar de las menores dosis empleadas.

- b) Puede formar otros subproductos perjudiciales, entre los que destacan los bromatos y aldehídos.
- c) No mantiene una concentración residual persistente, lo que obliga a emplear cloro o cloraminas en la desinfección final, si se desea mantener un desinfectante residual.
- d) Al ser el ozono un oxidante fuerte es extremadamente irritante y posiblemente tóxico por lo que puede producir trastornos en los tejidos humanos y particularmente en los ojos y pulmones.

7. CONCLUSIONES

- El proceso de desinfección más extendido se basa en el empleo de cloro como principal desinfectante. El mayor problema que presenta es la formación de subproductos organoclorados, en especial en aguas superficiales de mala calidad que contienen concentraciones elevadas de materia orgánica.
- Una alternativa al tratamiento tradicional con cloro, debería combinar la eliminación previa de precursores orgánicos, con un desinfectante menos agresivo que el cloro.
- La calidad de la desinfección con ozono es muy superior a la que se consigue con cloro debido a su mayor poder oxidante. El ozono al ser altamente reactivo, también genera subproductos orgánicos e inorgánicos. El ozono puede evitar la formación de algunos de los subproductos de la cloración pero no es capaz de mantener el efecto desinfectante posterior del cloro residual.
- Se debería reconsiderar la utilización exclusiva del cloro en el proceso de desinfección del agua potable y combinar el uso de cloro y del ozono, obteniendo lo mejor de cada proceso.
- La Organización Mundial de la Salud indica que no se debe comprometer una correcta desinfección, ante los efectos a largo plazo que originarían los subproductos de la desinfección.

8. BIBLIOGRAFIA

- Directiva 98/83/CE del Consejo de 3 de noviembre de 1998 relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano.
- Real Decreto por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano, R.D. Nº 140/2003, de 7 de febrero, 2003.
- Orden SSI/304/2013, de 19 de febrero, sobre sustancias para el tratamiento del agua destinada a la producción de agua de consumo humano.
- Organización Mundial de la Salud (OMS). Guías para la calidad del agua potable: http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/fulltext.pdf
- Aguado Alonso, J. “¿Cómo se potabilizan las aguas para el consumo humano?”. Red Madrileña de Tratamientos Avanzados de Aguas Residuales (Remtavares, 25-de febreo de 2009).
- Domenech, J. “Ozono frenente a Cloro. OFFARM Vol. 23 Mayo 2004.
- Manual de tratamiento de agua de consumo humano. “Junta de Castilla y León. Consejería de sanidad”. Depósito legal VA-910/09
- Olmedo Sanchez, M.T. “Subproductos de la desinfección del agua por el empleo de compuestos de cloro. Efectos sobre la salud”. Higiene y Sanidad Ambiental 8: 335-342 (2008).
- Rocha Castro, E. Ingeniería de tratamieto y acondicionamiento de aguas. Universidad Autonoma de Chihuahua (2010).
- Ramirez Quiros, F. Tratamiento de desinfección del agua potable. Editorial Canal Educa (2005). ISBN: 84-933694-3-4
- Ramos, M.H; Romero, E. “Como escribir un artículo de revisión”. http://www.med.unne.edu.ar/revista/revista26/como_esc_articulo.thm.
- Sanchez Zafra, A. “Efecto de los trihalometanos sobre la salud”. Hig. Sanid. Ambient. 8: 280-290 (2008)
- Villanueva, C; Manolis Kogevinas y Joan Grimalt. “Cloración del agua potable y efectos sobre la salud: revisión de estudios epidemiológicos”. Medicina Clínica. Vol. 117 Núm. 01-09. Junio 2001.