



**Remoción del virus de la hepatitis A en el agua para consumo:
Una revisión del estado del arte**

María Jazmin Torres Monsalve

Proyecto de practica para optar al título de ingeniera ambiental

Asesor interno

Diana Catalina Rodríguez Loaiza, Doctora en ingeniería

Asesor externo

Gustavo Antonio Peñuela Mesa

Coordinador Grupo GDCON

Universidad de Antioquia

Facultad de ingeniería, escuela ambiental

Ingeniería ambiental

Medellín

2023

Cita	(Torres Monsalve, 2022)
Referencia	Torres Monsalve, M. (2022). <i>Remoción del virus de la hepatitis a en el agua para consumo: Una revisión del estado del arte</i> [semestre de industria]. Universidad de Antioquia, Medellín.
Estilo APA 7 (2020)	



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director: Julio César Saldarriaga Molina.

Jefe departamento: Diana Catalina Rodríguez Loaiza.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Tabla de contenido

Resumen	4
Abstract	5
Introducción	6
Planteamiento del problema	7
1 objetivos	8
1.1 Objetivo general	8
1.2 Objetivos específicos	8
2 Marco teórico	9
3 Metodología	11
4 Estado del Arte	12
4.1 Coagulación y sedimentación	12
4.2 Desinfección física	12
4.2.1 Filtración.	12
4.2.2 Irradiación ultravioleta	14
4.3 Desinfección química: Ozonización, cloración, monocloramincación y dióxido de cloro.	15
4.4 Tecnologías de desinfección emergentes	16
5 análisis	18
6 Conclusión	20
Referencias	21

Resumen

El virus de la hepatitis A se transmite mediante agua o alimentos contaminados por vía fecal-oral, anualmente se reportan 1.5 millones de casos, siendo los lugares con un saneamiento básico ineficiente los más afectados. En este estudio se realizó una revisión bibliográfica sobre la remoción del virus de la hepatitis A en el agua potable, usando bases de datos y buscadores de artículos académicos. Se encontró que la eliminación de VHA ha sido estudiada por métodos de desinfección física y química convencionales, además hay algunos estudios de remoción de virus con tratamientos no convencionales. Finalmente se concluye que el VHA es más fácil de remover o inactivar del agua potable en comparación con otros virus, además de que es crucial combinar varios tratamientos para garantizar una mejor desinfección del agua.

Palabras clave: virus de hepatitis A (VHA), sistemas de tratamiento del agua, inactivación viral

Abstract

The hepatitis A virus is transmitted through water or food contaminated by the fecal-oral route, 1.5 million cases are reported annually, with places with inefficient basic sanitation being the most affected. In this study, a bibliographical review on the removal of the hepatitis A virus in drinking water is conducted, using databases and academic article search engines. It is found that the elimination of HAV has been studied by conventional physical and chemical disinfection methods, in addition there are some studies of virus removal with unconventional treatments. Finally, HAV is easier to remove or inactivate from drinking water compared to other viruses, in addition to the fact that it is crucial to combine different treatments to guarantee better water disinfection.

Keywords: hepatitis A virus (HAV), water treatment systems, viral inactivation

Introducción

La gestión inapropiada o insuficiente del saneamiento y servicios de agua estarían exponiendo a la población a riesgos que son prevenibles como lo son las enfermedades como la disentería, la colera, la fiebre tifoidea, la poliomielitis, la hepatitis a y otras diarreas (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2022a). Los virus se encuentran entre los patógenos preocupantes a la salud humana; Los virus entéricos se excretan en grandes cantidades por medio de las heces humanas y se transmiten principalmente por vía fecal-oral, entre estos virus se encuentran los norovirus, el rotavirus, el virus de la hepatitis E y el virus de la hepatitis A (VHA) (Salvador et al., 2020b). En cuanto al VHA en países con deficiencias en el saneamiento y prácticas de higiene el 90% de los niños contrae la infección por este virus antes de los 10 años y muchas veces no presentan síntomas, estos países suelen ser de ingresos bajos y medios, en cambio tasas bajas de infección se presentan en países de ingresos altos con mejor nivel de higiene y saneamiento (OMS, 2022b).

Por otro lado, los indicadores de contaminación fecal en el agua que se usan comúnmente no están correlacionados con la presencia de virus entéricos (Teixeira et al., 2020), además, han demostrado que los tratamientos de agua no siempre logran eliminar los virus de las fuentes de abastecimiento de agua para consumo humano lo que hace que sea importante el monitoreo de los virus desde las aguas residuales hasta el agua para consumo humano (Panizzolo et al., 2022).

De manera que el objetivo de la presente revisión es revisar los sistemas actuales aplicados para remover el VHA del agua a tratar para consumo humano y comparar la efectividad de los sistemas de remoción reportados en la literatura. Se realizó la búsqueda de información a través de palabras claves usando diferentes bases de datos con el fin de realizar un estado del arte sobre dicho tema.

Planteamiento del problema

El VHA se transmite cuando una persona que no ha sido infectada ni vacunada come o bebe algo que este contaminado por el virus y rara vez es mortal, sin embargo, podría llegar a causar insuficiencia hepática aguda (Instituto Nacional de Salud [INS], 2022). En países desarrollados el riesgo se asocia a la reutilización de aguas residuales tratadas para actividades como el riego de cultivos, mientras en países en vías de desarrollo la forma en que se transmite las enfermedades por el agua es debido al vertimiento de aguas residuales sin ningún tratamiento a fuentes de agua superficiales y malas condiciones sanitarias lo que propicia la transmisión de enfermedades (Pichel et al., 2019).

Por otro lado, la dosis infecciosa de los virus entéricos por lo general es baja (1 a 100 partículas), el uso de aguas contaminadas como fuente de abastecimiento de agua para consumo humano puede poner en riesgo la salud si no se realiza una eliminación o inactivación adecuada de los virus (Shirakawa et al., 2022). En consecuencia, es importante realizar una revisión del estado del arte en cuanto a las tecnologías y métodos que se usan para hacer frente a este riesgo enfocado al virus de la hepatitis A para determinar si dichos tratamientos son adecuados para la remoción o inactivación de este virus.

1 objetivos

1.1 Objetivo general

Realizar una investigación documental sobre los sistemas actuales de remoción del virus de la hepatitis A presentes en aguas a potabilizar.

1.2 Objetivos específicos

- Documentar el estado del arte sobre virus de la hepatitis A presente en aguas a potabilizar, a través de una búsqueda bibliográfica acerca de los diferentes sistemas que se implementan en la actualidad para eliminar el virus de la hepatitis A.
- Comparar la efectividad de cada uno de los sistemas de remoción de los virus reportados en la literatura.

2 Marco teórico

Los virus entéricos son los virus patógenos humanos que mayormente se transmiten por el agua, estos virus pueden invadir y replicarse en la mucosa del trato intestinal lo que puede causar enfermedades a los humanos, entre estos virus se encuentran: AdV, EV, virus aichi (AiV), sapovirus (SaV), NoV, virustorque teno (TTV), RoV, AstV, poliomavirus (PyV), virus de la hepatitis E (HEV) y virus de la hepatitis A (VHA) (Panizzolo et al., 2022).

En cuanto al VHA pertenece al género Hepatovirus de la familia Picornaviridae, su genoma está compuesto por ARN de cadena sencilla, posee una simetría icosaédrica y no presenta envoltura lipídica, aunque recientemente se ha encontrado una forma transitoria del virus donde este está recubierto por una bicapa lipídica (Báez et al., 2016). Los virus son considerados inertes ya que no poseen un metabolismo propio, el virus depende de la interacción con el huésped y además de la interacción con el medio ambiente cuando esta fuera del huésped, y representa riesgo de infección. Las posibilidades de que el virus persista fuera del huésped dependen de diferentes factores de ambiente como el calor, la humedad y el pH, lo cual varía en diferentes ambientes (Rzeżutka & Cook, 2004), Además, virus como EV, RV, VHA y NoV, pueden sobrevivir en agua natural con una fuerte infectividad durante más de un mes (Panizzolo et al., 2022).

Los virus entéricos se excretan en altas concentraciones en las heces infectadas y se pueden transmitir por vía fecal-oral. Las principales causas de contaminación biológica a las fuentes de producción de agua potable se identifican como la entrada de heces o aguas residuales debido a fuertes lluvias en las aguas subterráneas, la descarga de aguas residuales en agua superficiales, deficiencias de los procesos en las plantas de tratamiento de agua potable y las conexiones cruzadas, ruptura de tubería e ingreso de aguas residuales en el sistema de distribución (Panizzolo et al., 2022).

La detección de virus se puede realizar utilizando cultivos celulares y métodos moleculares. Los métodos de cultivo celular permiten la cuantificación de virus que potencialmente pueden replicarse en humanos, sin embargo, este método no se puede aplicar para detectar todos los virus dado que algunos no se pueden cultivar fácilmente. Además, pueden subestimar la concentración de virus en al menos 2-3 órdenes de magnitud. Por esta razón, la

detección de virus en el agua usualmente se realiza por métodos moleculares, que se basan en la detección de genomas virales, sin embargo, una de las desventajas de este método es que no pueden distinguir entre virus infecciosos e inactivados. Además de los métodos mencionados anteriormente, los virus también se pueden detectar mediante métodos híbridos que pueden estimar la integridad e infecciosidad del virus mediante un enfoque molecular. Algunos de dichos métodos incluyen viabilidad (transcriptasa inversa)-qPCR, cultivo celular integrado-PCR (ICC-PCR) y ensayos enzimáticos (Panizzolo et al., 2022).

Para contrarrestar la presencia del virus en el ambiente se han generado mecanismos de inactivación, por ejemplo, usando métodos de tratamiento convencionales como los llevados a cabo en la investigación de Rao et al. (1988), quienes estudiaron la eliminación del VHA, aplicando tratamientos de coagulación filtración y ablandamiento. En estudios sobre otros mecanismos no convencionales como el de inactivación por dióxido de cloro desarrollado por Li et al. (2004), se demostró que este compuesto es efectivo contra el virus pues inhibe su replicación al afectar su genoma y su cápside proteica. En este mismo trabajo se referencian otros estudios como el de Wang et al. (1995), donde se menciona que el VHA es afectado por la irradiación de rayos UV, pues estos pueden llegar a dañar su ARN. Bajo este mismo mecanismo Leveque et al. (1995), descubrieron que el virus infeccioso quedó completamente indetectable después de 15 minutos de irradiar con rayos UV 3 litros agua de mar contaminada experimentalmente con VHA, aunque la amplificación genómica por PCR permitió la detección de ARN viral en todas las muestras incluso después de 60 minutos de irradiación. Este estudio demostró que hay diferentes mecanismos de inactivación del virus, desde la destrucción de la cápside hasta la inhibición de su ARN.

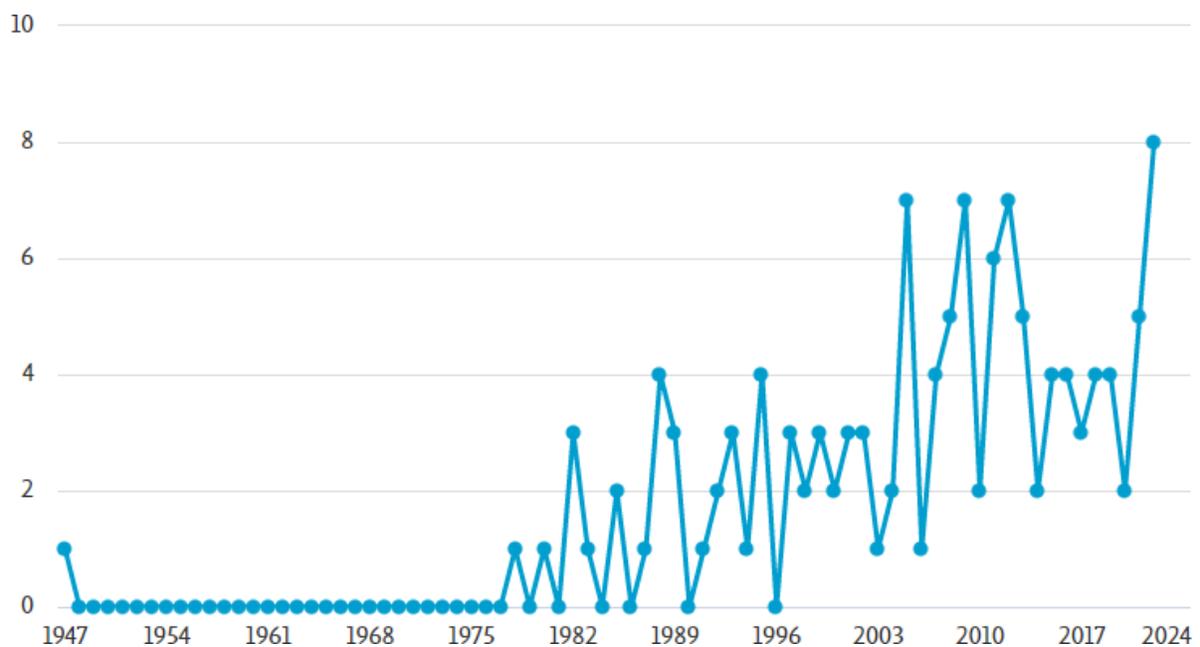
Es importante mencionar que las concentraciones de virus entéricos en muestras de agua tratada por lo general se encuentran por debajo del límite de cuantificación del PCR por lo que es necesario usar un método de concentración de estos virus para poder cuantificarlos, entre los métodos que se usan para la concentración de virus están los basados en membranas y en filtros electronegativos, además, las eficiencias de recuperación de virus y el grado de inhibición del ensayo de PCR dependen del método de concentración de virus, el tipo de virus, el volumen de muestra y la calidad del agua (Shirakawa et al., 2022).

3. Metodología

Se llevó a cabo un análisis bibliométrico a través de palabras claves. En el proceso de revisión se tuvo en cuenta todos los sistemas de tratamiento de agua convencionales y no convencionales para la remoción del virus de la hepatitis A que hayan sido concluyentes. No se impuso restricciones geográficas o de lenguaje, y se hizo uso de traductores de texto para acceder a la información en idiomas diferentes al español y al inglés. Las palabras claves para la búsqueda incluyeron “hepatitis a”, “drinking water”, “inactivation”, “disinfection”, “removal” y “water treatment”, para la base de datos Pubmed se obtuvieron 104 resultados, con Scopus se obtuvo 127, Science Direct arrojó 1089 resultados y por último se consultó en Scielo y en Dialnet donde se obtuvo 7 resultados en cada una.

En la figura 1 se muestran los resultados que se obtuvieron en Scopus por año.

Figura 1. *Numero de documentos por año*



Nota. Fuente: adaptado de Scopus, 2022.

4. Estado del Arte

4.1 Coagulación y sedimentación

Shirasaki et al. (2017) estudió la eliminación de algunos virus entre los que se incluía VHA por coagulación con cloruro de polialuminio (PACl, basicidad 1.5) seguido de sedimentación o sedimentación y filtración. En esta investigación se tomaron las muestras de agua de 6 fuentes que abastecían plantas de tratamiento de agua potable en las cuales se aplican coagulación con coagulantes a base de aluminio (PACl o alumbre) seguida de filtración rápida en arena. El estudio encontró que las proporciones de eliminación para VHA fueron 2.0–2.7-log lo que indica que el virus se adsorbió o quedó atrapado dentro de los flóculos de aluminio antes del proceso de sedimentación. Además, se investigó la dosis y tipo de coagulante para eliminar los virus donde se usó el doble de la dosis de PACl-1.5s dosis y también se comparó con alumbre, FeCl₃, PACl-2.1s y PACl-2.1ns todos los procesos fueron seguidos de sedimentación, como resultado encontraron que un PACl de alta basicidad no sulfatado (PACl-2.1ns) fue más eficiente para eliminar los virus en comparación con los otros coagulantes. Por otro lado, es importante mencionar que el VHA obtuvo mayor eliminación por coagulación en comparación con los otros virus analizados como coxsackievirus B5 y echovirus tipo 11.

4.2 Desinfección física

4.2.1 Filtración.

Shirasaki et al. (2017) evaluó la eficiencia de la microfiltración (MF) y la ultrafiltración (UF) directa para eliminar tres virus entéricos humanos: adenovirus [AdV] tipo 40, coxsackievirus [CV] B5 y virus de la hepatitis A [VHA] IB, donde se usaron ocho membranas MF diferentes y tres membranas UF diferentes. Por otra parte, también se analizó la eficiencia de MF con pretratamiento de cloruro de polialuminio de alta basicidad en este estudio se comparó PMMoV con las proporciones de eliminación de los virus entéricos humanos para evaluar la idoneidad de este virus como posible sustituto. Se encontró que los rendimientos en la eliminación del virus dependían de las membranas, además que un factor dominante fue la interacción de adsorción hasta que estos sitios quedaban saturados.

La UF directa con membranas con MWCO membrana de 1 kDa eliminó eficazmente los virus mediante la exclusión por tamaño con una eliminación de $>4 \log 10$. Además, la MF con pretratamiento de coagulación con PACl no sulfatados de alta basicidad que contenían especies de Al 30 obtuvieron rendimientos elevados de eliminación de virus de $>4\text{-log } 10$ a pH 7 y pH 8. En este estudio se encontró que la eliminación de los virus estudiados estaba altamente correlacionada con las proporciones de eliminación de PMMoV obtenidas con MF, UF y coagulación-MF, por lo que este podría ser un sustituto potencial para evaluar la eliminación de estos virus entéricos en dichos procesos.

Otros estudios también han usado combinación de procesos de coagulación y filtración rápida en arena como Shirasaki et al. (2018) quienes investigaron la eliminación de 3 tipos de virus entéricos humanos adenovirus (AdV) tipo 40, coxsackievirus (CV) B5 y virus de la hepatitis A (VHA), en este estudio usaron el agua de 8 plantas de tratamiento de agua potable en Japón, y compararon la eliminación de los virus entéricos con la del virus moteado suave del pimiento (PMMoV). Con la PCR se comprobó una eliminación de 1,1 a 2,4 log para el VHA sometido a los procesos de coagulación y filtración rápida en arena. Encontraron que la edad de la arena de sílice no afectó el rendimiento de la eliminación de virus mientras el coagulante PACl de alta basicidad sin sulfatos fue más eficiente en la eliminación de VHA en comparación con otros coagulantes a base de aluminio. Por último, en promedio 2,4 log fue la eficiencia máxima de remoción de los virus estudiados en esta investigación.

Otro estudio que abordó estos procesos fue el de Shirakawa et al (2022) en el cual se evaluó la eficiencia de reducción de virus entéricos humanos representativos (en los que se incluyó el VHA) en cuatro plantas de tratamiento de agua potable a gran escala ubicadas en Japón de las cuales dos fueron de coagulación-sedimentación-filtración rápida en arena (CS-RSF) y dos de coagulación-microfiltración (C-MF); además como indicador de la reducción de los virus entéricos se usó el virus moteado suave del pimiento (PMMoV). En este estudio se desarrolló un método de concentración de virus mediante el uso de un filtro electropositivo y una membrana de ultrafiltración de flujo tangencial para concentrar y recuperar PMMoV de grandes volúmenes de agua de manera eficaz (tasa de recuperación $>30\%$ en volúmenes de 2000 L). Se encontró que los virus entéricos humanos no siempre se pudieron cuantificar debido a que se

encontraban en concentraciones inferiores al límite de cuantificación lo cual sucedió con AdV, VHA y HuNoV, sin embargo, el PMMoV siempre se pudo cuantificar incluso después de aplicar el tratamiento de agua, debido a sus altas concentraciones en agua cruda y su alta resistencia al tratamiento con cloro. Para evaluar la eliminación de los virus entéricos humanos mediante CS-RSF y C-MF se puede usar el virus del moteado suave del pimiento (PMMoV) como un sustituto potencial; esta posibilidad está respaldada por índices de reducción más altos de virus entéricos ($> 1.2\text{-log } 10$) y norovirus humano Geno grupo II ($> 1.5\text{-log } 10$) que PMMoV ($0.9\text{-log } 10$) en una de las plantas estudiadas de CS-RSF, aunque en una de las plantas de tratamiento de C-MF no fue posible determinar si las relaciones de reducción fueron más altas en norovirus humano Geno grupo II ($> 1.4\text{-log } 10$) que en PMMoV ($2.3\text{-}2.9\text{-log } 10$).

4.2.2 Irradiación ultravioleta

En el trabajo de Jayán Kong et al. (2021) se menciona que la sensibilidad a la UV depende del microorganismo siendo las bacterias las de mayor sensibilidad seguidas por los virus sin envoltura con una sensibilidad similar a la de los protozoos, en cuanto a los virus envueltos la sensibilidad varía bastante. Para la inactivación se usan las lámparas de mercurio de media presión (MPML) y las lámparas de mercurio de baja presión (LPML). Las lámparas MPML emiten longitudes de onda UV de 200 a 380 nm, que dañan proteínas y ácidos nucleicos, mientras que las lámparas LPML emiten longitudes de onda UV de 254 nm, siendo la MPML más efectiva para la inactivación. El diodo emisor de luz ultravioleta (LED) también ha sido usado pero las aplicaciones en la desinfección del agua son pocas. En cuanto a el VHA tiene una constante (k) de inactivación (cm^2/kJ) de 0,181 para alcanzar la inactivación de 4 log con MPML. En la aplicación práctica del tratamiento del agua, la desinfección UV del virus en el agua potable requiere una tasa de inactivación de 4 log. Teniendo en cuenta que la mayoría de las empresas aún utilizan LPML como fuente de luz principal, las dosis de UV requeridas por diferentes microorganismos patógenos para alcanzar la inactivación de 4 log mediante la desinfección con LPML lo cual es lo sugerido para la práctica en el tratamiento de agua potable. Por otra parte, se ha sugerido que algunos virus de doble cadena de ADN como el adenovirus pueden ser resistentes al tratamiento con UV dado que el ADN dañado es capaz de seguir infeccioso.

4.3 Desinfección química: Ozonización, cloración, monocloraminación y dióxido de cloro.

El ozono es ampliamente usado debido a sus propiedades de gran capacidad de oxidación, la generación de menos subproductos comparado con otros desinfectantes químicos y la eliminación del color y el olor del agua. El ozono reacciona con el agua generando radicales libres e iones, como O_2^- , O^- , $HO_2\cdot$, $HO\cdot$. La reacción oxidativa es rápida, y por lo general, en los primeros 30 s se reduce el ozono residual a la mitad. En la inactivación de virus con este desinfectante se logra por lo menos un 1 log. Esta inactivación la logra destruyendo la envoltura de los virus que la poseen y los ácidos nucleicos de los virus sin envoltura, la cápside tiene una mayor resistencia al ozono que los ácidos nucleicos y estos a su vez presentan mayor resistencia que la envoltura (Kong et al., 2021).

Por otro lado, la desinfección con cloro ha sido ampliamente aplicada. El cloro gaseoso al entrar en contacto con el agua forma iones cloruro y ácido hipocloroso, por lo general, este último cuando se realiza la desinfección a un pH menor a 8.0 se considera como el principal desinfectante. El cloro inactiva los virus al dañar las cápsides virales y destruir los ácidos nucleicos expuestos. Li et al. (2002) encontró que la secuencia de 1–671 nt en la región 5' no codificante de VHA es más vulnerable al cloro. Esta región de secuencia contiene una estructura que está asociada con la replicación del virus. El cloro es menos reactivo que el ozono, lo que hace que sus procesos de inactivación sean diferentes en el caso de las bacterias (Kong et al. 2021).

En la desinfección también se usa monocloramina, la cual requiere un tiempo de contacto más prolongado que el cloro para lograr la misma eficiencia de desinfección, algunos virus como HAdV-2, EV-11 y CV B5, mostraron resistencia a la monocloramina. Como alternativa al cloro también se encuentra el dióxido de cloro (ClO_2) que presenta muy buen rendimiento en desinfección y logra eliminar el color y el olor de agua de manera efectiva y genera menos subproductos no deseados. Sin embargo, como es altamente inestable, el ClO_2 debe sintetizarse *in situ*, lo que hace que su aplicación sea costosa, pero en comparación con el cloro, el ClO_2 exhibió un mejor poder de desinfección para eliminar VHA (Chen et al., 2021).

En plantas de potabilización se puede usar una combinación de los diferentes métodos de remoción de virus como en el estudio de Salvador et al. (2020b) quienes evaluaron la eficiencia de la disminución de ARN viral de dos plantas de potabilización WTP_R y WTP_D de Portugal.

WTP_R tomo como fuente el agua de río y aplicó los siguientes procesos de tratamientos: peroxidación con ozono, ajuste de pH, adsorción con carbón activado, coagulación/floculación, sedimentación, filtración con filtros de arena, corrección de pH y desinfección con cloro. Mientras la fuente de agua de WTP_D fue de embalse, aplicándose peroxidación con cloro, remineralización y corrección de agresividad, coagulación, filtración con filtros de arena, corrección de pH y desinfección con cloro (Salvador et al., 2020a). Al evaluar la eficacia de las plantas de potabilización para disminuir la concentración de ARN viral, se encontró que era efectivo para Enterovirus y NoVI I mientras en el agua potable se detectaron los ARN de NoV II y VHA. El NoV II en al menos la mitad de las muestras, tuvieron presencia en concentraciones bajas de menos de 12,5 gc/L, más específicamente el VHA solo se detectó en una muestra de agua de WTP_D y en una concentración de 0.1 gc/L. Sin embargo, el VHA no se había encontrado en las aguas crudas, los autores sugieren que esto pudo deberse a las diferencias de volúmenes analizados, que para el agua potable fue mucho mayor. Por otra parte, en este trabajo solo se contempló la presencia de ARN viral por lo cual no se puede determinar si algunos de los virus presentes en el agua potable eran infecciosos (Salvador et al., 2020b).

4.4 Tecnologías de desinfección emergentes

Se ha demostrado ampliamente que la cavitación hidrodinámica (HC) es una tecnología eficaz y limpia para la desinfección del agua, es capaz de inactivar completamente varias bacterias, cianobacterias, microalgas y virus presentes en agua, como resultado de los efectos mecánicos, térmicos y químicos que acompañan al colapso de las burbujas de cavitación. La aplicabilidad de HC depende del rendimiento de los reactores de cavitación hidrodinámica (HCR). Recientemente, los HCR rotacionales avanzados (ARHCR), cuyos mecanismos de generación de cavitación son diferentes a los de los HCR convencionales, han demostrado una eficacia de tratamiento y puede ser viable económicamente comparado con otros tratamientos de desinfección. Además, los HCR se pueden combinar con métodos químicos o físicos, lo que los hace mucho más efectivos y económicos que los HC u otros métodos por sí solos, con una menor producción de subproductos. Sin embargo, hacen falta más avances en esta tecnología ya que hace falta criterios de diseño de HCR y conocer más de los mecanismos correspondientes (Sun et al., 2020).

El método electroquímico tiene un poder de desinfección de alta eficiencia para la potabilización de agua. La eficiencia de inactivación de microorganismos patógenos del sistema de desinfección electroquímica depende en gran medida de la estructura de la celda objetivo, los materiales de los electrodos, la composición de electrolitos, los microorganismos y otros parámetros. Los oxidantes generados electroquímicamente, como las sustancias activas de cloruro, mejoran la eficacia de la desinfección, mientras que el PO_4^{2-} , el HCO_3^- y el CO_3^{2-} tienen un efecto inhibitorio sobre la desactivación del proceso electroquímico. Se cree que el exceso de especies de cloro producido por el sistema electroquímico tiene desventajas similares que el uso del cloro en la desinfección del agua potable (Chen et al., 2021).

5 análisis

El proceso de coagulación y sedimentación ha mostrado tener un buen rendimiento para la eliminación del virus de la hepatitis A siendo el coagulante PACl-2.1ns el más eficiente, además, Heffron y Mayer (2016) concluyeron que este proceso puede llevar a una reducción de los virus entre 0,5 y 7 logs. Shirasaki et al. (2017) reportaron que el VHA se vuelve inactivo al estar en contacto con el PACl, y que el VHA es más sensible a la remoción con PACl en comparación con otros virus, aunque en general el tratamiento de coagulación es una buena alternativa para la remoción de muchos virus.

Por otra parte, la eficiencia de la microfiltración y la ultrafiltración para remover VHA depende de la membrana, siendo la membrana MWCO la de mayor eficiencia en la remoción (>4 log 10). También se obtuvo un rendimiento elevado al usar microfiltración y proceso de coagulación con PACl de alta basicidad, donde la filtración por membrana seguida de coagulación obtuvo los mejores resultados en comparación a los tratamientos de filtración de lecho profundo que con filtración rápida en arena se obtuvo un rendimiento máximo de eliminación del VHA de 2,4 log.

La eliminación de los virus entéricos por medio de tratamientos de filtración y coagulación aplicados uno precedido del otro o por separado se encontró que el virus moteado suave del pimiento (PMMoV) obtuvo una alta correlación con la eliminación de virus entéricos por lo que este se podría usar como indicador ya que se ha encontrado que los actuales indicadores de materia fecal no se correlacionan bien con la presencia de virus.

En cuanto al tratamiento con irradiación UV, el VHA al ser un genoma de ARN de cadena sencilla y sin envoltura, al ser sometido a este tratamiento se produce daño en el ARN llevando a su inactivación, en cambio, otros virus como el adenovirus han mostrado resistencia al tratamiento UV.

Otros tratamientos con desinfectantes como el cloro y la monoclорamina han mostrado buen rendimiento para la eliminación de virus, aunque con la monoclорamina necesita mayor tiempo de contacto en comparación con el cloro, pero con éste último tiene la desventaja en la generación de subproductos que son indeseados como los trihalometanos.

Por último, las tecnologías de desinfección emergentes también mostraron un buen rendimiento para la eliminación de virus, pero con algunas desventajas como la generación de

subproductos indeseados en el método electroquímico y la falta de criterios de diseño para la cavitación hidrodinámica.

6 Conclusión

De acuerdo con la revisión bibliográfica, varios métodos usados remueven de manera eficiente el agua contaminada con VHA como la coagulación y sedimentación y la desinfección química con cloro.

Se ha reportado estudios que no se ha podido cuantificar el genoma viral del VHA, pero si se encontró genoma de otros virus patógenos después de aplicados los tratamientos de desinfección, lo cual podría indicar que los tratamientos son eficientes para remover el virus VHA, pero no para remover otros virus.

Además, se encontró que hay poca correlación entre los indicadores de materia fecal en el agua y la presencia de virus patógenos por lo que la literatura sugiere la necesidad de establecer otro indicador que si abarque este riesgo.

Referencias

- Chen, L., Deng, Y., Dong, S., Wang, H., Li, P., Zhang, H., & Chu, W. (2021). The occurrence and control of waterborne viruses in drinking water treatment: A review. *Chemosphere*, 281, 130728. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130728>
- Instituto Nacional de Salud [INS]. (2022). Protocolo de Vigilancia en Salud Pública de Hepatitis A. Versión 4. <https://doi.org/10.33610/infoeventos.61>
- Heffron, J., & Mayer, B. K. (2016). Emerging investigators series: virus mitigation by coagulation: recent discoveries and future directions. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2(3), 443-459. 10.1039/C6EW00060F
- Kong, J., Lu, Y., Ren, Y., Chen, Z., & Chen, M. (2021). The virus removal in UV irradiation, ozonation and chlorination. *Water Cycle*, 2, 23-31. <https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2021.05.001>
- Li, J. W., Xin, Z. T., Wang, X. W., Zheng, J. L., & Chao, F. H. (2002). Mechanisms of inactivation of hepatitis A virus by chlorine. *Applied and environmental microbiology*, 68(10), 4951-4955. <https://doi.org/10.1128/AEM.68.10.4951-4955.2002>
- Li, J. W., Xin, Z. T., Wang, X. W., Zheng, J. L., & Chao, F. H. (2004). Mechanisms of inactivation of hepatitis A virus in water by chlorine dioxide. *Water Research*, 38(6), 1514-1519. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2003.12.021>
- Organización Mundial de la Salud [OMS]. (2022a). Agua para consumo. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
- Organización Mundial de la Salud [OMS]. (2022b). Hepatitis A. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/hepatitis-a#:~:text=La%20hepatitis%20A%20es%20una,adquieren%20inmunidad%20de%20por%20vida>
- Panizzolo, M., Gea, M., Carraro, E., Gilli, G., Bonetta, S., & Pignata, C. (2022). Occurrence of human pathogenic viruses in drinking water and in its sources: A review. *Journal of Environmental Sciences*. <https://doi-org.udea.lookproxy.com/10.1016/j.jes.2022.07.035>
- Pichel, N., Vivar, M., & Fuentes, M. (2019). The problem of drinking water access: A review of disinfection technologies with an emphasis on solar treatment methods. *Chemosphere*, 218, 1014-1030. <https://doi-org.udea.lookproxy.com/10.1016/j.chemosphere.2018.11.205>
- Rao, V. C., Symons, J. M., Ling, A., Wang, P., Metcalf, T. G., Hoff, J. C., & Melnick, J. L. (1988). Removal of hepatitis A virus and rotavirus by drinking water treatment. *Journal-American Water Works Association*, 80(2), 59-67. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1988.tb02994.x>
- Rzeżutka, A., & Cook, N. (2004). Survival of human enteric viruses in the environment and food. *FEMS microbiology reviews*, 28(4), 441-453. <https://doi.org/10.1016/j.femsre.2004.02.001>
- Salvador, D., Caeiro, M. F., Serejo, F., Nogueira, P., Carneiro, R. N., & Neto, C. (2020a). Monitoring Waterborne Pathogens in Surface and Drinking Waters. *Are Water*

- Treatment Plants (WTPs) Simultaneously Efficient in the Elimination of Enteric Viruses and Fecal Indicator Bacteria (FIB)?. *Water*, 12(10), 2824. <https://doi.org/10.3390/w12102824>
- Salvador, D., Neto, C., Benoliel, M. J., & Caeiro, M. F. (2020b). Assessment of the presence of hepatitis E virus in surface water and drinking water in Portugal. *Microorganisms*, 8(5), 761. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8050761>
- Shirakawa, D., Shirasaki, N., Matsushita, T., Matsui, Y., Yamashita, R., Matsumura, T., & Koriki, S. (2022). Evaluation of reduction efficiencies of pepper mild mottle virus and human enteric viruses in full-scale drinking water treatment plants employing coagulation-sedimentation-rapid sand filtration or coagulation-microfiltration. *Water Research*, 213, 118160. <https://doi-org.udea.lookproxy.com/10.1016/j.watres.2022.118160>
- Shirasaki, N., Matsushita, T., Matsui, Y., Murai, K., & Aochi, A. (2017) Elimination of representative contaminant candidate list viruses, coxsackievirus, echovirus, hepatitis A virus, and norovirus, from water by coagulation processes. *Journal of hazardous materials*, 326, 110-119. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.11.005>
- Shirasaki, N., Matsushita, T., Matsui, Y., & Murai, K. (2019). Assessment of the efficacy of membrane filtration processes to remove human enteric viruses and the suitability of bacteriophages and a plant virus as surrogates for those viruses. *Water research*, 115, 29-39. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.02.054>
- Shirasaki, N., Matsushita, T., Matsui, Y., & Yamashita, R. (2018). Evaluation of the suitability of a plant virus, pepper mild mottle virus, a surrogate of human enteric viruses for assessment of the efficacy of coagulation-rapid sand filtration to remove those viruses. *Water research*, 129, 460-469. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.02.054>
- Sun, X., Liu, J., Ji, L., Wang, G., Zhao, S., Yoon, J. Y., & Chen, S. (2020). A review on hydrodynamic cavitation disinfection: The current state of knowledge. *Science of the Total Environment*, 737, 139606. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139606>
- Teixeira, P., Salvador, D., Brandão, J., Ahmed, W., Sadowsky, M. J., & Valério, E. (2020). Environmental and adaptive changes necessitate a paradigm shift for indicators of fecal contamination. *Microbiology Spectrum*, 8(2), 8-2. <https://doi.org/10.1128/microbiolspec.ERV-0001-2019>