eVitroKhem. 2022; 1:49
doi: 10.56294/evk202249

REVISIÓN

Advanced Treatment of Hospital Wastewater using POAs: Evaluation and Technological Application

Tratamiento Avanzado de Aguas Residuales Hospitalarias mediante POA's: Evaluación y Aplicación Tecnológica

Sara Juliana Jaramillo Arvilla[1], Julián Diel Urresta Aragón[1], Natali Lorena Mena Guerrero[1], Carla Stephanny Cárdenas Bustos[1]

[1]Universidad de Pamplona, Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Programa de Ingeniería Química, Norte de Santander. Pamplona, Colombia.

Citar como: Jaramillo Arvilla SJ, Urresta Aragón JD, Mena Guerrero NL, Cárdenas Bustos CS. Advanced Treatment of Hospital Wastewater using POAs: Evaluation and Technological Application. eVitroKhem. 2022; 1:49. https://doi.org/10.56294/evk202249

Enviado: 29-01-2021 **Revisado:** 12-01-2022 **Aceptado:** 18-07-2022 **Publicado:** 19-07-2022

Editor: Prof. Dr. Javier Gonzalez-Argote

ABSTRACT

Introduction: the study addressed the environmental problems associated with wastewater generated by hospitals, which contains contaminants that are difficult to remove using conventional methods. In Colombia, current regulations established strict limits for its discharge, which prompted the search for more effective technologies such as Advanced Oxidation Processes (AOPs).
Development: the research described the classification and composition of hospital liquid waste, as well as the physicochemical parameters required by Resolution 0631 of 2015. Subsequently, different traditional treatments (primary, secondary, and tertiary) were explored, and AOPs were examined in greater depth, including ozonation, the Fenton process, and photocatalysis. These methods used highly oxidizing agents, such as hydroxyl radicals, capable of degrading recalcitrant compounds present in hospital effluents. The operating conditions and operating principles of each technique were analyzed, as well as their technical and economic feasibility.
Conclusions: the study concluded that POAs represented an effective solution for the tertiary treatment of hospital wastewater. The technologies evaluated significantly improved parameters such as COD, BOD5, and total suspended solids. However, their effectiveness depended on specific operating variables such as pH and oxidant dosage. It was highlighted that the integration of POAs with biological treatments could optimize results and reduce operating costs, promoting more sustainable environmental management in the healthcare sector.

Keywords: Hospital Wastewater; Advanced Oxidation; Ozonation; Fenton Process; Photocatalysis.

RESUMEN

Introducción: el estudio abordó la problemática ambiental asociada a las aguas residuales generadas por hospitales, las cuales contienen contaminantes difíciles de eliminar mediante métodos convencionales. En Colombia, la normativa vigente estableció límites estrictos para su vertimiento, lo que impulsó la búsqueda de tecnologías más eficaces como los Procesos de Oxidación Avanzada (POA's).
Desarrollo: la investigación describió la clasificación y composición de los residuos líquidos hospitalarios, así como los parámetros fisicoquímicos exigidos por la Resolución 0631 de 2015. Posteriormente, se exploraron los diferentes tratamientos tradicionales (primarios, secundarios y terciarios) y se profundizó en los POA's, entre ellos la ozonización, el proceso Fenton y la fotocatálisis. Estos métodos emplearon agentes altamente oxidantes, como el radical hidroxilo, capaces de degradar compuestos recalcitrantes presentes en los efluentes hospitalarios. Se analizaron las condiciones operativas y los principios de funcionamiento de cada técnica, así como su viabilidad técnica y económica.

© 2022; Los autores. Este es un artículo en acceso abierto, distribuido bajo los términos de una licencia Creative Commons (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0) que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio siempre que la obra original sea correctamente citada

Conclusiones: el trabajo concluyó que los POA's representaron una solución eficaz para el tratamiento terciario de aguas residuales hospitalarias. Las tecnologías evaluadas lograron mejorar significativamente parámetros como la DQO, la DBO5 y los sólidos suspendidos totales. No obstante, su efectividad dependió de variables operativas específicas como el pH y la dosis de oxidantes. Se destacó que la integración de POA's con tratamientos biológicos podría optimizar los resultados y reducir costos operativos, promoviendo una gestión ambiental más sostenible en el sector salud.

Palabras clave: Aguas Residuales Hospitalarias; Oxidación Avanzada; Ozonización; Proceso Fenton; Fotocatálisis.

INTRODUCCIÓN

Los hospitales y centros de atención médica generan diariamente grandes volúmenes de aguas residuales como resultado de sus múltiples procesos asistenciales, administrativos y de laboratorio. Estas aguas contienen una mezcla compleja de compuestos orgánicos e inorgánicos, microorganismos patógenos, fármacos sin metabolizar, materiales radioactivos y sustancias químicas potencialmente tóxicas, lo que las convierte en una fuente importante de contaminación para el medio ambiente si no se tratan adecuadamente. Debido a su peligrosidad, este tipo de aguas residuales no puede ser tratada de forma eficiente por los sistemas convencionales empleados en las plantas de tratamiento municipales, lo que plantea un reto significativo tanto en términos de salud pública como de sostenibilidad ambiental.

En Colombia, la normatividad ambiental vigente, en particular la Resolución 0631 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, establece los límites máximos permisibles para diversos parámetros fisicoquímicos en las descargas de aguas residuales generadas por actividades de atención en salud humana. Esta normativa busca prevenir la contaminación de cuerpos hídricos, proteger la biodiversidad y garantizar la salud de las comunidades expuestas a estos vertimientos. Sin embargo, el cumplimiento de estos estándares requiere la aplicación de tecnologías avanzadas capaces de remover eficazmente los contaminantes presentes en estos efluentes.

En este contexto, los Procesos de Oxidación Avanzada (POA's) han ganado relevancia como una alternativa viable y eficiente para el tratamiento terciario de aguas residuales hospitalarias. Estos procesos se basan en la generación de especies altamente reactivas, como los radicales hidroxilos (•OH), que permiten la degradación completa o parcial de contaminantes recalcitrantes. Técnicas como la ozonización, el proceso Fenton y la fotocatálisis han demostrado ser efectivas en la mineralización de materia orgánica, la eliminación de patógenos y la reducción de parámetros críticos como la DQO y la DBO.

El presente trabajo tiene como propósito analizar la composición y características de las aguas residuales generadas en una institución hospitalaria y evaluar la aplicabilidad de tecnologías de oxidación avanzada en su tratamiento. La investigación se enmarca en la necesidad de implementar soluciones innovadoras que permitan mejorar la calidad del efluente final, asegurar el cumplimiento de la normativa ambiental y minimizar los impactos negativos sobre el entorno, contribuyendo así a la gestión integral del recurso hídrico en el sector salud.

DESARROLLO

Marco teórico

Aguas Residuales Hospitalarias

Los hospitales y centros médicos en general son una fuente importante de efluentes con desechos peligrosos e infecciosos para el medio ambiente, generalmente los flujos de los desechos se clasifican en 3 clases, a saber: desechos municipales que se componen de materiales no peligrosos como desechos de la cocina y reciclables en los que se encuentran: papel, cartón y plásticos; desechos médicos, estos se incluyen en desechos peligrosos e infecciosos tales como desechos anatomopatológicos, desechos de cirugía y materiales como agujas, vasos rotos desechos líquidos incluidos desechos farmacéuticos, químicos y biológicos de laboratorios; y desechos radioactivos.

Su peligrosidad radica en el contenido de microorganismos patógenos, materia orgánica y sustancias de interés sanitario.[1] los hospitales requieren importantes volúmenes de agua por día, generando otro volumen similar de agua residual con microorganismos patógenos, medicamentos metabolizados o no, compuestos tóxicos, entre otros, que se vierten tratadas o no al agua, afectando su calidad y poniendo en riesgo la salud.

Normatividad

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible presenta en el 2015 la Resolución 0631,[2] que su objetivo es reducir y controlar las sustancias contaminantes que llegan a los ríos, embalses, lagunas, cuerpos de agua

naturales o artificiales de agua dulce, y al sistema de alcantarillado público, para de esta manera, ayudar al mejoramiento de la calidad del agua y trabajar en la recuperación ambiental de las vías fluviales del país.[3] En la tabla 1 se muestran los parámetros evaluados por la norma vigente, donde se especifican las unidades de cada parámetro y los límites máximos permisibles para cada uno de ellos.

Tabla 1. Parámetros de la resolución 0631[2]

Parametro	Unidades	Actividades de atencion a la salud humana- atencion medica con y sin internacion
Generales		
pH	unidades de pH	6,00-9,00
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/O2	200,00
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)	mg/O2	150,00
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	50,00
Sólidos Sedimentables (SSED)	mg/L	5,00
Grasas y Aceites	mg/L	10,00
Fenoles	mg/L	0,20
Formaldehido	mg/L	
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	mg/L	Análisis y Reporte
Compuestos de Fosforo		
ortofosfatos ($PO^{3-}4$)	mg/L	Análisis y Reporte
Fósforo Total (P)	mg/L	Análisis y Reporte
compuestos de Nitrógeno		
Nitratos (N-NO3-)	mg/L	Análisis y Reporte
Nitritos (N-NO2-)	mg/L	Análisis y Reporte
Nitrógeno Amoniacal (N-NH3)	mg/L	Análisis y Reporte
Nitrógeno Total (N)	mg/L	Análisis y Reporte
Iones		
Cianuro Total (CN-)	mg/L	0,50
Metales y Metaloides		
Cadmio (Cd)	mg/L	0,05
Cromo (Cr)	mg/L	0,50
Mercurio (Hg)	mg/L	0,01
Plata (Ag)	mg/L	Análisis y Reporte
Plomo (Pb)	mg/L	0,10
Otros parámetros para análisis y reporte		
Acidez Total	mg/L CaCO3	Análisis y Reporte
Alcalinidad Total	mg/L CaCO3	Análisis y Reporte
Dureza cálcica	mg/L CaCO3	Análisis y Reporte
Dureza Total	mg/L CaCO3	Análisis y Reporte
Color Real (Medidas de absorbancia a las siguientes longitudes de onda: 436 nm 525 nm y 620 nm)	m-1	Análisis y Reporte

Parámetros evaluados en la norma

A continuación, se describen cada uno de los parámetros evaluados por la Resolución 631 del 2015 para actividades de atención a la salud humana- atención medica con o sin internación.[2]

Generales

- pH. Es una medida de acidez o alcalinidad de una dilución acuosa que se define como el logaritmo de la actividad o concentración molar de iones hidrógeno en el agua, expresada como el algoritmo negativo de la concentración molar de ion hidrógeno.[4]
- Demanda Química de Oxígeno (DQO). Es la cantidad equivalente de oxígeno requerido para mineralizar la materia orgánica presente en una muestra. Se utiliza un oxidante fuerte como permanganato de potasio.[5]

- Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5): Cantidad de oxígeno requerido por las bacterias para llevar a cabo el proceso de degradación de materia orgánica que sirve como alimento a las bacterias y que su oxidación genera energía en condiciones aeróbicas.[5]
- Sólidos Suspendidos Totales (SST). Material particulado que permanecen en suspensión en el agua como colides debido al movimiento del agua.[4]
- Sólidos Sedimentables (SSED). Volumen de las partículas sólidas que se depositan por la fuerza de la gravedad en un recipiente donde el líquido permanece inmóvil durante 60 min.[4]
- Grasas y aceites. Sustancias de origen vegetal o animal, esteres formados por moléculas de ácidos grasos y una molécula de glicerol, pueden ser sólidos (grasas) o líquidos (aceites).[4]
- Fenoles. Los fenoles o compuestos fenólicos son compuestos orgánicos cuyas estructuras moleculares contienen al menos un grupo fenol, un anillo aromático unido al menos a un grupo funcional hidroxilo, compuestos comunes en efluentes de la industria del petróleo, el carbón, plantas químicas, fábricas de explosivos, de resinas y otras.
- Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM). Las sustancias activas al azul de metileno (SAAM) es un colorante catiónico, transfieren el azul de metileno desde una solución acuosa a un líquido inmiscible en equilibrio. Esto ocurre durante la formación de un par iónico entre el anión (SAAM) y el catión azul de metileno. La intensidad del color resultante es una medida de las sustancias activas al azul de metileno.[4]

Compuestos de fósforo

- Ortofosfatos (PO4). Fosfatos avanzados definidos como sal inorgánica del ácido fosfórico.
- Fósforo Total (P). El fósforo total es la suma de todas las formas de fósforo existentes: ortofosfato o fosfatos, fosfatos condensados y fósforo orgánico.

Compuestos de nitrógeno

Se denomina sustancias o compuestos nitrogenados a las biomoléculas que contienen nitrógeno, ya sea macromoléculas o productos de desecho como lo son Nitratos (NO3), Nitritos (NO2), y Nitrógeno Amoniacal (NH3).

Iones

Cianuro Total (CN-). Se refiere a todos los grupos (CN-) en compuestos químicos que pueden ser determinados como ion cianuro. Los cianuros son compuestos potencialmente tóxicos y ante un cambio de pH del medio puede liberar ácido cianhídrico, compuesto de máxima toxicidad para el ser humano.

Metales y metaloides

Cadmio (Cd), Cromo (Cr), Mercurio (Hg), Plata (Ag), Plomo (Pb). Como constituyentes importantes de muchas aguas, cualquier catión que tenga un peso atómico superior a 23 g/mol (que corresponde al peso atómico del sodio) se considera un metal pesado; así, las aguas residuales contienen gran número de metales pesados diferentes. Entre ellos se puede destacar níquel, manganeso, plomo, cromo, cadmio, zinc, cobre, hierro y mercurio, entre otros. Todos ellos se encuentran catalogados como sustancias contaminantes y debido a su naturaleza tóxica deben tenerse obligatoriamente en consideración porque causan impacto negativo sobre los tratamientos biológicos convencionales, así como sobre los ecosistemas receptores.

Otros parámetros para análisis y reporte

- Acidez Total (mg/L). se refiere a la presencia de sustancias disociables en agua y que como producto de disociación generan el ion hidronio (H3O+), como son los ácidos fuertes, ácidos débiles y de fuerza media; también la presencia de ciertos cationes metálicos como el Fe (III) y el Al (III) contribuyen a la acidez del medio.[4]
- Alcalinidad Total. capacidad del agua para neutralizar ácidos o aceptar protones. Esta representa la suma de las bases que pueden ser tituladas en una muestra de agua.[4]
- Dureza Total (mg/L). Indica la cantidad total de iones alcalinotérreos (grupo 2) presentes en el agua y constituye un parámetro de calidad de las aguas de interés doméstico o industrial. involucra a todos los iones metálicos polivalentes que puedan encontrarse presentes en la muestra.[4]
- Dureza Cálcica (Ca2 + y Mg2 +). cuantifica solo la dureza por efecto del ion Calcio.[4]
- Color Real (Medidas de absorbancia a las siguientes longitudes de onda. 436 nm, 525 nm y 620 nm). El color en el agua resulta de la presencia en solución de diferentes sustancias como iones metálicos naturales, humus y materia orgánica disuelta. La expresión color real se considera como el color del agua de la cual se ha eliminado la turbiedad.

Tratamiento de las aguas residuales

Los tratamientos para descontaminar las aguas residuales tienen como objeto mitigar y disminuir el nivel

de contaminación, para obtener un efluente que no genere impactos ambientales negativos, cumpliendo con la normatividad ambiental vigente. Los tratamientos tradicionales son los mecánicos o también llamados fisicoquímicos, que son el conjunto de tratamientos primarios, secundarios y terciarios.[6]

Tratamiento primario

El objetivo del tratamiento primario es eliminar una fracción significativa de los sólidos en suspensión y material flotante de las aguas residuales por sedimentación.[7] Los sólidos en suspensión eliminados son de naturaleza orgánica y, por lo tanto, contribuyen a la DBO (demanda bioquímica de oxígeno) del lodo. El material flotante puede incluir aceite, grasa, trapos, entre otros.[8]

Por otra parte, el tratamiento primario mejorado químicamente se refiere a un proceso que utiliza productos químicos para la coagulación, floculación y precipitación de partículas.[9]

Coagulación. En este proceso se da la desestabilización de las partículas coloidales cargadas electroestáticamente. La coagulación es un proceso que permite incrementar la tendencia de las partículas de agregarse una tras otra para formar partículas mayores y así precipitar rápidamente, esto puede verse ayudado con el uso de coagulantes tales como el alumbre (sulfato de aluminio) y el cloruro de hierro. Algunos polímeros orgánicos y materiales de arcilla se usan también para estimular este proceso. Una vez coaguladas, las partículas más grandes son más fáciles de retirar que las más pequeñas. Las partículas más grandes se convierten en un material llamado flóculo. Este material esponjoso tiene un área de superficie más grande y ayuda más en el proceso de clarificación al atrapar partículas más pequeñas en su superficie.[10]

Floculación. Es un complemento de la coagulación, formación de flóculos como resultado de la colisión y adherencia entre partículas coaguladas consiste en la agitación de la masa coagulada

que sirve en el crecimiento y aglomeración de los flóculos recién formados con la finalidad de aumentar el tamaño y peso necesario para sedimentar con facilidad.[10]

Sedimentación. Separación mecánica de sólidos o gotas de líquidos a través de un fluido (en reposo o en movimiento) por acción de fuerzas gravitacionales, en los tratamientos de aguas residuales es uno de los procesos unitarios más utilizados, debido a que el peso específico de las partículas suspendidas es mayor que el del agua, la sedimentación en esencia es un fenómeno netamente físico y esta operación se emplea para la eliminación de arenas con el objetivo principal de obtener de un efluente clarificado, pero es evidente que se hace necesario producir un fango cuya concentración de solidos permita su fácil tratamiento y manejo.[11]

Tratamientos secundarios

El tratamiento secundario es la fase de tratamiento final antes de la desinfección, suele consistir en el tratamiento biológico de las aguas residuales efluentes primarias. Los objetivos del tratamiento secundario son disminuir la demanda bioquímica de oxígeno (DBO5) y los sólidos en suspensión del efluente a niveles aceptables.

El tratamiento secundario de aguas residuales está diseñado para descomponer y evacuar el material de las aguas residuales antes de regresarlo a lagos, riachuelos, ríos y océanos.[6]

Tratamientos aerobios. Los tratamientos con aireación son utilizados para descomponer materia orgánica por acción de los microorganismos y el oxígeno presente en el aire convirtiéndose en dióxido de carbono y otras especies oxidadas.[12]

Tratamientos anaerobios. La biodegradación anaerobia consiste en la transformación, por medio de microorganismos, en ausencia de oxígeno, de la materia orgánica de las aguas residuales en compuestos gaseosos reducidos como el metano, el amoníaco y el ácido sulfúrico, además de dióxido de carbono. En este tratamiento se utilizan reactores cerrados en un proceso hermético.[13]

Tratamientos mixtos. Son la mezcla de tratamientos aerobios y anaerobios, bien de forma seguida, alternante o ambos a la vez.[13]

Tratamientos facultativos. Estos tratamientos biológicos utilizan organismos denominados facultativos y no les afecta la presencia de oxígeno en el proceso.[13]

Tratamiento terciario (procesos de oxidación avanzada)

Cuando el efluente del tratamiento secundario no cumple con la normativa o los requisitos para la descarga, es necesario un tratamiento adicional para reducir los niveles de contaminantes específicos. Esto generalmente se denomina tratamiento avanzado o tratamiento terciario. Los procesos de tratamiento avanzados se utilizan para la eliminación de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo, la eliminación de sólidos suspendidos totales residuales, la eliminación de metales pesados o inorgánicos específicos y la eliminación de contaminantes emergentes de interés, entre otros.[6]

Los procesos de oxidación avanzada (POA´s) son aquellos tratamientos terciarios que están basados en la generación de especies fuertemente oxidantes que tienen como objetivo principal la eliminación de compuestos solubles no biodegradables presentes en las aguas residuales, estos consisten en una oxidación química en

condiciones suaves de presión y temperatura, hasta la mineralización completa de contaminantes. Si el proceso se prolonga suficiente o quedándose en estados de oxidación intermedios que permitan un acoplamiento con otros métodos de depuración como pueden ser los procesos biológicos.

Los POA´s se apoyan en procesos fisicoquímicos capaces de originar cambios importantes en la estructura química de los contaminantes, que implican la generación y uso de especies poderosas transitorias, principalmente el radical hidroxilo (OH•), la generación de radicales se realiza a partir de oxígeno, agua oxigenada y catalizadores soportados, por lo que los subproductos de reacción son únicamente agua y dióxido de carbono.[14]

Los POA´s se pueden clasificar de diversas formas, como se muestra en la tabla 2, como procesos no fotoquímicos y procesos fotoquímicos en función de la participación de la luz en el proceso.

Tabla 2. POA más utilizados[14]

Procesos no fotoquímicos	**Procesos fotoquímicos**
Ozonización	Ultravioleta de vacío
Ozonización con O3/H2O2	UV/H2O2
	UV/O3
Procesos Fenton (Fe^{+2}/H2O2) y relacionados	
oxidación electroquímica	UV/O3/H2O2
Radiólisis y tratamiento con haces de electrones	Fotocatálisis solar Homogénea: Foto-Fenton y relacionada Heterogénea: Fotocatálisis con TiO2
Plasma no térmico	
Oxidación en agua subcrítica y supercrítica	
Irradiaciones gamma	
Aceleradores de electrones	

Los POA´s usan reactivos costosos como el peróxido de hidrógeno o el ozono, o consumen grandes cantidades de energía (UV, entre otros),[14] ha confirmado que cuando se combinan con otros procesos tales como adsorción o procesos biológicos adquieren su potencial en cuanto a eficiencia económica por el ahorro en productos químicos y/o energía.

Ozonización

El proceso de ozonización es un proceso no fotoquímico donde se genera especies muy reactivas principalmente el radical hidroxilo en cantidades suficientes para interaccionar con los compuestos orgánicos del medio. El ozono se puede utilizar para la mineralización (eliminación de COT) de moléculas orgánicas, aunque en muchos casos implica el uso de altas dosis de ozono y el sobreprecio del proceso.

En la ozonización, la eficacia depende de la contaminación química y biológica del agua a ser tratada, del tiempo de contacto y de la concentración del ozono.

En la figura 1, podemos observar los componentes del proceso de ozonización el cual cuenta con la preparación del gas de alimentación, generación del ozono, contacto del ozono que suele realizarse bien por difusores de burbuja o mediante inyectores del tipo Venturi y la destrucción del ozono que se realiza por destrucción térmica o por destrucción catalítica con catalizadores de paladio, óxido de níquel o manganeso.

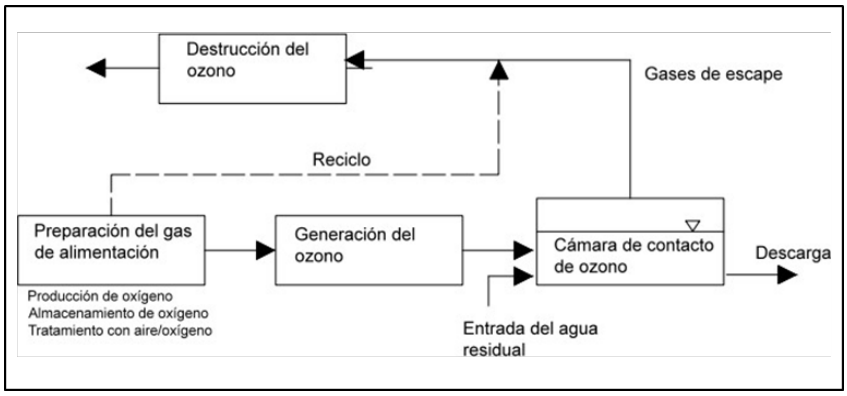

Figura 1. Proceso de ozonización

El ozono se produce en un generador de ozono. El gas de alimentación puede ser aire u oxígeno puro.

Aproximadamente de 1 a 10 por ciento del oxígeno que fluye por los electrodos se transforma en ozono.[15]

Existen diferentes métodos para la producción de ozono que se pueden dividir en tres categorías, según se utilice: la descarga de corona, la descarga electroquímica y los métodos UV. Entre ellas, la descarga de corona o también conocido como "descargas eléctricas silenciosas", es el método de generación más utilizado.

El ozono en su uso industrial ya sea partiendo del aire o de oxígeno puro, se obtiene por descarga eléctrica alterna de alta tensión. Por otro lado, para evitar la formación de un arco eléctrico (descarga eléctrica silenciosa), los dos electrodos están separados por un medio dieléctrico, generalmente vidrio. La descarga de corona entre los dos electrodos causa que un electrón fluya a través del hueco de descarga, como se muestra en la figura 2.

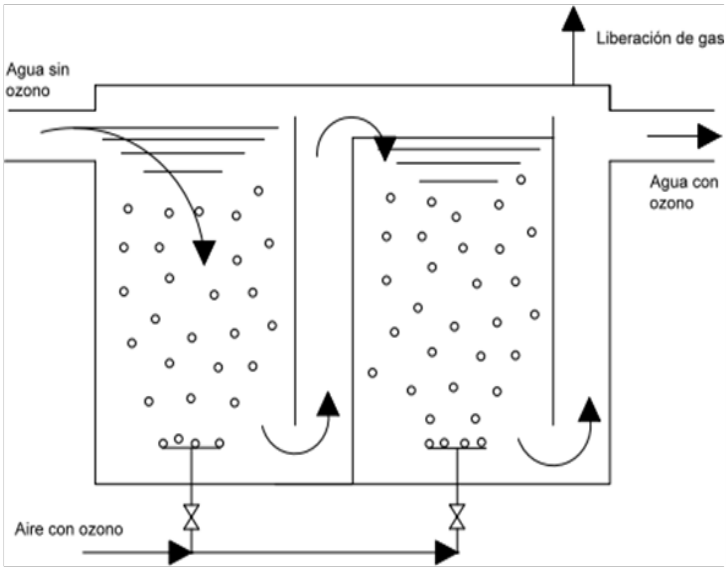

Figura 2. Producción de ozono[15]

Estos dispositivos de descarga de corona generan gran cantidad de calor (alrededor de 80 a 95 por ciento de la energía se convierte en calor) que podría provocar la descomposición del ozono producido. Así pues, el sistema de refrigeración de los ozonizadores es muy importante para mantener una temperatura constante del gas dentro de la cámara de descarga. Este sistema se realiza normalmente mediante la circulación de un refrigerante que podría ser: agua o aire.[15] Es necesario que el ozono entre en contacto con el agua a tratar y que se disperse de la manera más fina posible. Normalmente, esto se realiza a través de difusores de burbujas finas en cámaras de contacto. Los tipos de cámaras de contacto de burbujas difusas más utilizados son: inyección de presión positiva, de presión negativa, de agitación mecánica y las torres de lecho fijo. Los difusores de cámara con deflectores parecen ser los más comunes.

En la figura 3 se muestra una cámara de contacto con deflectores. Una cámara típica generalmente tiene varios compartimentos en serie con difusores de burbuja en el fondo. En el primer compartimiento, el agua fluye hacia abajo en sentido contrario al de las burbujas, que ascienden, y en el segundo compartimiento el agua fluye hacia arriba. Las cámaras se cubren para prevenir el escape de ozono y aumentar la presión parcial del ozono en la cámara. Las cámaras adicionales garantizan el tiempo de contacto entre el ozono y el agua.[16]

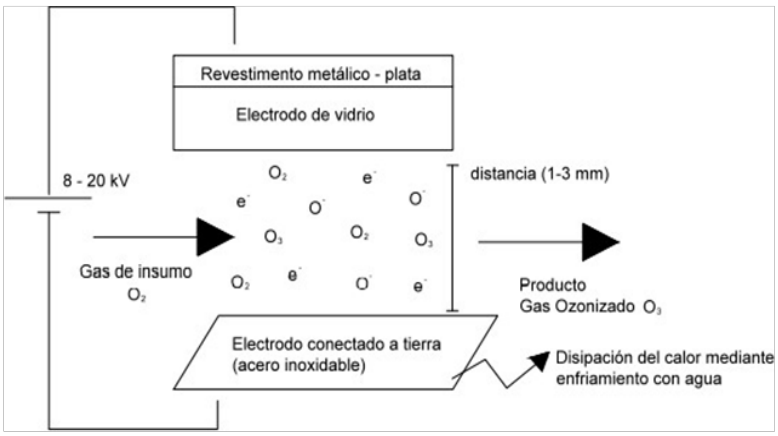

Figura 3. Cámara de contacto con deflectores[16]

Generalmente, existe un reactor principal donde ocurre el proceso de Fenton en modo discontinuo, normalmente en tanque no presurizado, en condiciones atmosféricas, que dispone de una serie de bombas externas para poder adicionar el agente para el ajuste del pH (ya sea ácido o base), y dosificar el sulfato de hierro (II) y el peróxido de hidrógeno (35-50 %) en disolución. Después de llenar el tanque de oxidación con el agua residual, la adición de los reactivos se lleva a cabo como se puede observar en la figura 4, a través de este procedimiento.

- Añadir el ácido o la base para ajustar el pH hasta 2,5-4 (2,8 idealmente).
- Añadir los reactivos poco a poco para que no ocurran cambios bruscos de pH o la temperatura
- Añadir el sulfato de hierro (II) y después el H2O2.
- Se pasa a un tanque de neutralización para adicionar una base.
- Precipitar el hidróxido de hierro en la forma de lodo.
- Coagular el lodo en un tanque de floculación

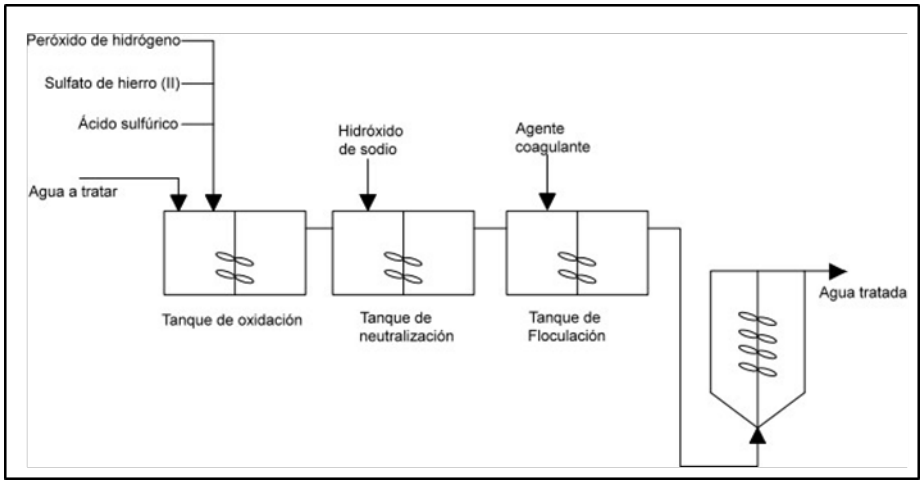

Figura 4. Esquema industrial del proceso Fenton[14]

Fotocatálisis

La fotocatálisis emplea radiación UV y/o visible como fuerza motriz de tratamiento de aguas. Este proceso causa la aceleración de una reacción fotoquímica mediante la presencia de un catalizador (sensibilizador), que da lugar a la eliminación de materia orgánica y metales pesados disueltos en el agua residual. Dentro de la fotocatálisis se tienen dos tipos de técnicas: procesos heterogéneos, mediados por un semiconductor como catalizador, y los procesos homogéneos en donde el sistema es usado en una sola fase (ósea, catalizador disuelto). La fotocatálisis se aplica cuando el contaminante por sí mismo no es capaz de capturar fotones, y por lo tanto se requiere el uso de un sensibilizador (el catalizador) que absorbe la energía radiante y acelera la oxidación. La aplicación de radiación solar para la realización de procesos fotoquímicos sólo es posible con ciertos catalizadores y dependiendo de la configuración del foto-reactor, como por ejemplo cationes de hierro disuelto o dióxido de titanio en fase sólida, para catálisis heterogénea o homogénea, respectivamente. Mediante esta tecnología se generan oxidantes como el radical hidroxilo que, en medio acuoso, reaccionan con los contaminantes orgánicos degradándolos a dióxido de carbono, agua y otras sales. Además, se puede promover la desinfección del agua.[14,17]

CONCLUSIONES

El manejo adecuado de las aguas residuales hospitalarias representa uno de los principales desafíos ambientales y sanitarios en el contexto actual, debido a la presencia de compuestos recalcitrantes, microorganismos patógenos, residuos farmacéuticos y metales pesados que no son eliminados eficientemente mediante tratamientos convencionales. La naturaleza compleja de estos efluentes exige la implementación de soluciones tecnológicas avanzadas que garanticen la depuración efectiva del agua antes de su disposición final en cuerpos receptores o su reincorporación a los sistemas de tratamiento municipales.

La normatividad colombiana, a través de la Resolución 0631 de 2015, establece parámetros claros para la descarga de aguas residuales generadas en el sector salud, lo cual obliga a las instituciones hospitalarias a adoptar estrategias más rigurosas y sostenibles en su gestión ambiental. En este sentido, los Procesos de Oxidación Avanzada (POA's) surgen como una herramienta fundamental en el tratamiento terciario de estos efluentes, al permitir la degradación de contaminantes persistentes que escapan a los procesos fisicoquímicos y biológicos tradicionales.

Entre las tecnologías evaluadas, la ozonización, el proceso Fenton y la fotocatálisis demostraron alto

potencial para la remoción de contaminantes específicos como materia orgánica no biodegradable, color, fenoles y ciertos metales pesados. Estas técnicas, aunque requieren condiciones controladas y pueden implicar costos operativos elevados, ofrecen ventajas importantes al lograr una mayor mineralización de los compuestos orgánicos y una mejora significativa en parámetros clave como la DQO, la DBO5, y los sólidos suspendidos totales.

No obstante, la eficiencia de estos procesos está sujeta a factores como el pH, la concentración de oxidantes, el tiempo de contacto y la configuración del reactor, lo cual exige una adecuada caracterización del efluente y un diseño técnico adaptado a las necesidades específicas de cada institución. Asimismo, se destaca la posibilidad de integrar los POA's con tratamientos biológicos o sistemas de adsorción para optimizar la eficiencia y reducir costos, fomentando esquemas híbridos más sostenibles y económicamente viables.

En conclusión, el uso de tecnologías avanzadas como los POA's representa una solución técnica eficaz y ambientalmente responsable para el tratamiento de aguas residuales hospitalarias. Su implementación adecuada contribuiría significativamente a la protección de los recursos hídricos, el cumplimiento normativo y la mejora de la calidad ambiental en el sector salud colombiano.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Ministerio del Medio Ambiente. Resolución 01164 de 2002 [Internet]. 2002 [citado 2021 jun 15]. Disponible en: http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=36291

2. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Resolución 631 de 2015 [Internet]. 2015 [citado 2021 jun 15]. Disponible en: http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/d1res_631_marz_2015.pdf

3. Manuel J, Navarrete R. Normatividad colombiana en los vertimientos hospitalarios: impactos ambientales y de salud pública. 2016.

4. Rojas JAR. Calidad del agua [Internet]. 2009 [citado 2021 ago 25]. Disponible en: https://www.belzona.com/es/industries/wastewater.aspx

5. Oikawa S, Tsuda M, Okamura Y, Urabe T. Prefulvene as a stable intermediate at the potential energy surface minimum of the benzene benzvalene isomerization process. J Am Chem Soc. 1984;106(22):6751–5. doi:10.1021/ja00334a047

6. Mitcheson L, Maslin J, Meynen T, Morrison T, Hill R, Wanigaratne S. Fundamentals of treatment. In: Applied Cognitive and Behavioural Approaches to the Treatment of Addiction [Internet]. 2010 [citado 2021 may 2]. Disponible en: https://doi.org/10.1002/9780470661420.ch3

7. Centa. Manual de depuración de aguas residuales urbanas [Internet]. Centa, Secretariado de Alianza por el Agua, Ecología y Desarrollo; 2008 [citado 2021 sep 25];264. Disponible en: http://alianzaporelagua.org/documentos/MONOGRAFICO3.pdf

8. Bes Monge SS, Silva DAM, Bengoa DC. Manual técnico sobre procesos de oxidación avanzada aplicados al tratamiento de aguas residuales industriales [Internet]. Belzona Inc.; 2016 [citado 2021 sep 7]. Disponible en: http://www.cyted.org/sites/default/files/manual_sobre_oxidaciones_avanzadas_0.pdf

9. Shin J, Choi S, Park CM, Wang J, Kim YM. Reduction of antibiotic resistome in influent of a wastewater treatment plant (WWTP) via a chemically enhanced primary treatment (CEPT) process. Chemosphere. 2022;286(P1):131569. doi:10.1016/j.chemosphere.2021.131569

10. Belzona. Guía de aplicaciones Belzona en equipos de tratamiento de aguas residuales - Tratamiento de aguas residuales [Internet]. Belzona Inc.; 2010 [citado 2021 sep 7];40. Disponible en: https://www.belzona.com/es/industries/wastewater.aspx

11. McCabe WL, Smith JC, Harriot P, Colton RH. Operaciones unitarias en ingeniería química. 7.ª ed. México: McGraw-Hill; 2013.

12. Muyo C. Procesos biológicos aerobios [Internet]. Curso sobre tratamiento y reciclaje de aguas residuales industriales mediante soluciones sostenibles; 2016 [citado 2021 jun 19]. Disponible en: http://triton-cyted.com/wp-content/uploads/2017/04/Presentaci%C3%B3n.pdf

13. González O, Bayarri B, Aceña J, Pérez S, Barceló D. Treatment technologies for wastewater reuse: fate of contaminants of emerging concern. In: The Handbook of Environmental Chemistry [Internet]. 2015 [citado 2021 may 2];5–37. Disponible en: https://doi.org/10.1007/698_2015_363

14. Muñoz M, Garcia-Muñoz P, Pliego G, De Pedro ZM, Zazo JA, Casas JA, Rodriguez JJ. Application of intensified Fenton oxidation to the treatment of hospital wastewater: kinetics, ecotoxicity and disinfection. J Environ Chem Eng. 2016;4(4):4107–12. doi:10.1016/j.jece.2016.09.019

15. Santiago EB, Calderón Ancona JM. Diseño y construcción de un generador de ozono para aplicaciones de purificación de agua. 2005;120.

16. Camenforte M, Pérez J. Alternativa a la desinfección del agua con cloro: ozonización. 2014;1–20.

17. Torán J, Blánquez P, Caminal G. Comparison between several reactors with Trametes versicolor immobilized on lignocellulosic support for the continuous treatments of hospital wastewater. Bioresour Technol. 2017;243:966–74. doi:10.1016/j.biortech.2017.07.055

FINANCIACIÓN

Ninguna.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Conceptualización: Sara Juliana Jaramillo Arvilla, Julián Diel Urresta Aragón, Natali Lorena Mena Guerrero, Carla Stephanny Cárdenas Bustos.

Curación de datos: Sara Juliana Jaramillo Arvilla, Julián Diel Urresta Aragón, Natali Lorena Mena Guerrero, Carla Stephanny Cárdenas Bustos.

Análisis formal: Sara Juliana Jaramillo Arvilla, Julián Diel Urresta Aragón, Natali Lorena Mena Guerrero, Carla Stephanny Cárdenas Bustos.

Investigación: Sara Juliana Jaramillo Arvilla, Julián Diel Urresta Aragón, Natali Lorena Mena Guerrero, Carla Stephanny Cárdenas Bustos.

Metodología: Sara Juliana Jaramillo Arvilla, Julián Diel Urresta Aragón, Natali Lorena Mena Guerrero, Carla Stephanny Cárdenas Bustos.

Administración del proyecto: Sara Juliana Jaramillo Arvilla, Julián Diel Urresta Aragón, Natali Lorena Mena Guerrero, Carla Stephanny Cárdenas Bustos.

Recursos: Sara Juliana Jaramillo Arvilla, Julián Diel Urresta Aragón, Natali Lorena Mena Guerrero, Carla Stephanny Cárdenas Bustos.

Software: Sara Juliana Jaramillo Arvilla, Julián Diel Urresta Aragón, Natali Lorena Mena Guerrero, Carla Stephanny Cárdenas Bustos.

Supervisión: Sara Juliana Jaramillo Arvilla, Julián Diel Urresta Aragón, Natali Lorena Mena Guerrero, Carla Stephanny Cárdenas Bustos.

Validación: Sara Juliana Jaramillo Arvilla, Julián Diel Urresta Aragón, Natali Lorena Mena Guerrero, Carla Stephanny Cárdenas Bustos.

Visualización: Sara Juliana Jaramillo Arvilla, Julián Diel Urresta Aragón, Natali Lorena Mena Guerrero, Carla Stephanny Cárdenas Bustos.

Redacción – borrador original: Sara Juliana Jaramillo Arvilla, Julián Diel Urresta Aragón, Natali Lorena Mena Guerrero, Carla Stephanny Cárdenas Bustos.

Redacción – revisión y edición: Sara Juliana Jaramillo Arvilla, Julián Diel Urresta Aragón, Natali Lorena Mena Guerrero, Carla Stephanny Cárdenas Bustos.