

**Estudio de la aplicación de los procesos fotocatalíticos para la remoción de metales
pesados presentes en aguas residuales industriales**

Stephanie Ortiz Páez

Universidad nacional abierta y a distancia UNAD

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente (ECAPMA)

Dr. Sonia Esperanza Ruiz

Bogotá D.C, Colombia

Octubre 2021

Agradecimientos

Primero agradezco a Dios por permitirme, estar culminando una de las etapas más hermosas e importante de mi vida, a él gracias por un logro más. Gracias a mi tutora de grado Sonia Ruiz, por guiarme, orientarme por cada consejo y conocimiento brindado que me sirvió en la elaboración de mi tesis de grado, mi admiración total.

A mi familia, mi padre Ludwing por su ayuda y amor, a mi madre Gladis que desde el cielo me ha guiado en este proceso, mis hermanos Jenniffer y Ludwing por toda la entrega y motivación y a Juan Sebastián que ha estado desde un inicio en este camino, guiándome, aconsejándome y teniéndome paciencia.

Gracias a mi universidad por permitirme convertirme en profesional en lo que más me gusta y me apasiona.

Resumen

El agua es un recurso esencial utilizado en casi la mayoría de las actividades humanas. Diferentes factores como la industrialización, el aumento poblacional, promueven el incremento constante de la demanda de agua y como consecuencia las fuentes hídricas se ven más exigidas por la captación del agua y por ende su contaminación. Las aguas residuales son vertidas a las fuentes hídricas sin previo tratamiento. Por tal motivo se generan problemas como son la bioacumulación de metales pesados. Los metales pesados que se encuentran en gran cantidad en las aguas residuales son: plomo, mercurio, cromo, cadmio, arsénico, entre otros y dependiendo de sus oxidaciones y concentraciones es su toxicidad, generando no solo problemas hacia la salud humana sino también ambiental, creando desgaste de este recurso. Los procesos fotocatalíticos utilizados principalmente en aguas residuales industriales, son considerados tecnologías prácticas, sostenibles y efectivas para la remoción de metales pesados. Estos procesos usualmente consisten en interacciones electrónicas entre ligandos H_2O_2 con Fe y Cu que permiten la degradación química a través de especies oxidativas, que, a su vez, generan vacancias de la forma OH^{-1} , estas prácticas denominadas procesos avanzados de oxidación están siendo ampliamente investigado mediante experimentación. En ese sentido, esta monografía pretende, analizar los procesos aplicados a la remoción de metales pesados, presentes en aguas residuales industriales, por medio de la Fotocatálisis.

Palabras claves:

Fotocatálisis, remoción de metales pesados, aguas residuales, cromo, dióxido de titanio.

Abstract

Water is an essential resource used in almost most human activities. Different factors such as industrialization, population growth, promote the constant increase in the demand for water and consequently the water sources are more demanded by the capture of water and therefore its contamination. Wastewater is discharged to water sources without prior treatment. For this reason, problems such as the bioaccumulation of heavy metals are generated. The heavy metals that are found in large quantities in wastewater are lead, mercury, chromium, cadmium, arsenic, among others and depending on their oxidations and concentrations is their toxicity, generating not only problems for human health but also environmental, creating waste of this resource. The photocatalytic processes used mainly in industrial wastewater are considered practical, sustainable, and effective technologies for the removal of heavy metals. These processes usually consist of electronic interactions between H_2O_2 bonds with Fe and Cu that allow chemical degradation through oxidative species, which, in turn, generate vacancies of the OH-1 form, these practices called advanced oxidation processes are being widely investigated through experimentation. In this sense, this monograph aims to analyze the processes applied to the removal of heavy metals, present in industrial wastewater, by means of Photocatalysis.

Keywords: Photocatalysis, removal of heavy metals, Sewage water, chrome, Titanium dioxide.

Tabla de contenido

Agradecimientos	2
Resumen	3
Abstract	4
Lista de Ilustraciones.....	9
Lista de tablas.....	10
Lista de gráficas	11
Lista de ecuaciones	12
Introducción	13
Planteamiento del problema.....	15
Justificación.....	17
Objetivos	18
Objetivo general	18
Objetivos específicos	18
Marco teórico	19
Contaminación ambiental	19
Biodegradación	19
Capacidad de carga	19
Metales pesados	19
Origen y distribución de los metales pesados	20

Aguas residuales.....	21
Aguas residuales domésticas.....	22
Aguas residuales industriales	22
Características principales de las aguas residuales	25
Tratamiento y depuración de las aguas residuales	25
Procesos de tratamiento de aguas residuales.....	25
Tratamiento preliminar:	25
Procesos físicos o primarios.....	26
Filtrados por membrana	26
Sedimentación primaria	27
Flotación.....	27
Osmosis inversa	27
Filtración	27
Procesos biológicos o secundarios.....	28
Lagunas de estabilización	28
Acción del carbón activado.....	29
Plantas macrófitas	29
Lodo activado.....	29
Procesos químicos o terciarios	30
Aplicación de electricidad al agua residual.....	30

Procesos de oxidación avanzada	30
Semiconductores	32
Fotocatálisis	33
Beneficios de la fotocatalisis con el semiconductor TiO ₂	33
Características del Dióxido de titanio	34
Factores que afectan el proceso fotocatalítica.....	35
pH.....	35
Características del catalizador.....	35
Temperatura	35
Intensidad de la radiación.....	35
Diseño del reactor	35
Aditivos.....	36
Fotocatálisis heterogénea	37
Fotocatálisis homogénea	39
Diferencias entre la Fotocatálisis Heterogénea y fotocatalisis Homogénea	40
Afectaciones a la salud y medio ambiente	42
Estado del arte	49
Análisis del estado de arte.....	65
Gráficas	67
Conclusiones	70

Recomendaciones..... 72

Referencias..... 73

Lista de ilustraciones

Ilustración 1. Filtrado por membrana	26
Ilustración 2. Filtración de aguas residuales Filtración de aguas residuales	28
Ilustración 3. Plantas macrófitas.....	29
Ilustración 4. Diagrama del proceso de acción de la fotocatalisis	33
Ilustración 5. TiO ₂	34

Lista de tablas

Tabla 1 Principales fuentes de contaminación de metales en los alimentos	21
Tabla 2. Emisores directos en las aguas residuales por actividad.....	23
Tabla 3. Objetivo de los procesos de pretratamiento	25
Tabla 4 Diferencias entre la Fotocatálisis Homogénea y Fotocatálisis Heterogénea	40
Tabla 5 Afectación a la salud humana y medio ambiente.....	44

Lista de gráficas

Gráfica 1. Publicaciones SCOPUS por año.67

Gráfica 2. Artículos publicados en cada país69

Lista de ecuaciones

EC. 1	$h\nu + SC \rightarrow e^- + p^+$	37
EC. 2	$A_{ads} + e^- \rightarrow A^- (ads)$	37
EC. 3	$D_{ads} + p^+ \rightarrow D + ads$	37
EC. 4	$Fe^{+2} + H_2O_2 \rightarrow Fe^{+3} + OH + OH^-$	39
EC. 5	$K = 76.5 L mol^{-1} s^{-1}$	39
EC. 6	$Fe^{+3} + H_2O_2 \leftrightarrow FeOOH + 2 H^+$	39
EC. 7	$K_{eq} = 3.1 \times 10^{-3}$	39
EC. 8	$FeOOH + 2 H^+ \rightarrow H_2O_2 + Fe^{+2}$	39
EC. 9	$K_{eq} = 2.7 \times 10^{-3} s^{-1}$	39
EC. 10	$Fe^{+3} + H_2O_2 \rightarrow Fe^{+2} + O_2 + H^+$	39
EC. 11	$k < 2 \times 10^3 L mol^{-1} s^{-1}$	39

Introducción

Se denomina agua residual aquella que es resultante del uso de las actividades antrópicas. Estas aguas sufren alteraciones en los parámetros fisicoquímicos (sólidos disueltos totales, conductividad eléctrica, dureza, pH, temperatura, coliformes totales, oxígeno disuelto, turbidez, cloruros, nitrógeno, nitritos, nitratos, sólidos suspendidos) debido a los componentes o sustancias tóxicas que reciben, resultando contaminantes y perjudiciales para los recursos naturales y también para el ser humano. Las aguas residuales que no reciben un tratamiento adecuado representan una grave amenaza para los ecosistemas y para la salud del hombre. El agua contaminada está relacionada con la transmisión de enfermedades como el cólera, diarreas, disentería, hepatitis A, la fiebre tifoidea y la poliomielitis. Los tratamientos de agua ineficientes, inexistentes o gestionados de forma inapropiada exponen a la población a riesgos para la salud. Se calcula que unas 842.000 personas mueren cada año de diarrea como consecuencia de la insalubridad del agua (Organización Mundial de la Salud, 2019).

El desarrollo demográfico e industrial ha provocado un incremento exponencial de la contaminación de los recursos hídricos, lo que hace necesario desarrollar y aplicar procesos y tecnologías que permitan devolver los parámetros físicos, químicos y biológicos de las aguas residuales a su estado natural (Mera Benavides & Guarín Lianes, 2011).

El sistema para medir el impacto que tiene la presencia del ser humano y sus actividades sobre el planeta es la huella ecológica. Este concepto surgió en el año 1990 y se utiliza para medir el impacto que tiene el ser humano sobre la tierra. El tamaño de la huella ecológica crece constantemente a causa del crecimiento poblacional. En los últimos 40 años la cantidad de habitantes en el planeta se duplicó. Este aumento es directamente proporcional al consumo de recursos naturales, así como fuentes de contaminantes. Todo esto representa una mayor

producción de residuos lo que implica cargas adicionales para la capacidad receptora del medio ambiente. De allí surge la necesidad de establecer formas para dar un tratamiento efectivo a las aguas residuales (Earthgonomic , 2015).

En la actualidad existen diferentes técnicas para el tratamiento y disposición de las aguas residuales. Estas técnicas involucran un proceso dependiendo del nivel de purificación que se pretenda proporcionar. El tratamiento del líquido residual puede ser tan simple como un proceso de asentamiento y filtrado, hasta procesos más complejos como la purificación total del agua.

La elección de la infraestructura y tecnología para la gestión de las aguas negras depende directamente de la capacidad económica y gobernanza de cada país o territorio, un ejemplo de esto es el continente europeo el cual cubre casi el 100% de acceso a servicios de saneamiento adecuado, diferente a África con solo el 43% de la población con acceso a estos servicios. etc.) (Olleros, 2013).

Los procesos de oxidación avanzada (POA) son una alternativa viable y novedosa para el tratamiento de los efluentes líquidos industriales. Estos consisten en la formación de radicales hidroxilo altamente oxidantes, los cuales contribuyen a la mineralización total de los compuestos contaminantes presentes en las aguas residuales. Entre los procesos más utilizados se encuentra la fotocatalisis que consiste en la aceleración de una fotorreacción mediante un catalizador (Garcés Giraldo , Mejía Franco , & Santamaría Arango).

En esta investigación se pretende documentar las técnicas para el tratamiento de aguas residuales industriales mediante los procesos de fotocatalisis. Estos procesos se basan en la absorción directa o indirecta de energía radiante (visible o UV) por un sólido (fotocatalizador que normalmente es un semiconductor de banda ancha).

Planteamiento del problema

Durante mucho tiempo, las aguas residuales fueron consideradas como una complicación a ser desechada. Sin embargo, la demanda creciente del recurso hídrico y la contaminación ha llevado a reconocer la necesidad de mejorar la gestión del agua. Históricamente se han relacionado más de 800.000 muertes a causa del consumo de agua contaminada y junto a una superficie de 245.000Km de ecosistemas marinos afectados (ONU, 2017). Estas situaciones generan diferentes repercusiones en la insuficiencia de agua para consumo, afectando la salubridad de los productos agropecuarios, generando enfermedades, deterioro de los ecosistemas, entre otros. La contaminación del agua en Colombia con residuos peligrosos es responsabilidad en gran medida del sector industrial, y el deficiente control y protección por parte de las entidades ambientales hace que este problema cada día sea más crítico. Para el año 2011 solo el 9% de las aguas recibían un tratamiento adecuado antes de ser vertidas a fuentes hídricas (Mera Benavides & Guarín Lianes, 2011).

Por otra parte, los metales pesados presentes en el agua residual como el mercurio (Hg), plomo (Pb), arsénico (As), zinc (Zn), Cadmio (Cd), cromo (Cr) y níquel (Ni). Debido a su toxicidad afectan de forma significativa la salud y por ser sustancias bio-acumulables amenazan la seguridad alimentaria (Reyes, Vergara, Torres, Díaz y Gonzales, 2016). En ese sentido, se ha atribuido al consumo de agua contaminada por metales pesados, ser uno de los precursores de enfermedades como el cáncer, envenenamientos y daños en órganos vitales (Combariza, 2009; Nava-Ruíz & Méndez Armenta 2011).

De acuerdo con lo anterior, la remoción de metales pesados constituye un reto en términos ambientales y tecnológicos. Muchos sistemas como coagulantes y procesos electrolíticos han sido propuestos en la literatura para remoción de estos contaminantes, sin

embargo, estas técnicas derivan la generación de residuos y requieren energía para funcionar. Adicionalmente, muchos de estos métodos requieren reactivos costosos o procedimientos que resultan poco prácticos.

Sin embargo, considerando que los metales podrían ser recuperados de la mezcla mediante procesos de intercambio iónico, se pretende incorporar la fotocatalisis como proceso de tratamiento alternativo para la remoción de metales presentes en aguas residuales industriales. Lo que se considera como una mejora para la remoción de estos. En ese sentido, este estudio espera ofrecer la respuesta a la pregunta de investigación. ¿Qué tan viable es emplear tecnologías fotocatalisis para la remoción de metales pesados, presente en aguas residuales Industriales?

Justificación

La búsqueda de tecnologías limpias para el tratamiento de contaminantes ha contribuido al desarrollo de los procesos de oxidación avanzada (POA), siendo estos una de las tecnologías más utilizadas en el tratamiento de aguas contaminadas por procesos industriales (Fernando Garcés Giraldo et 2015.). Estos procesos poseen la ventaja de tener una capacidad potencial para efectuar una profunda mineralización de los contaminantes orgánicos y oxidación de los compuestos inorgánicos (Garcés, Mejía y Santamaría,). De igual forma su reactividad es posible con la mayoría de los compuestos orgánicos y evita la presencia de subproductos tóxicos.

Uno de esos procesos de oxidación avanzada es, la oxidación fotocatalítica, la cual es considerada una alternativa ambiental y consiste en la remoción de los contaminantes mediante el empleo de radiación solar ultravioleta y empleando catalizadores con el objeto de formar radicales hidroxilos, los cuales posteriormente tendrán un efecto oxidante sobre los contaminantes químicos. En los últimos años se ha descubierto cómo la reacción UV/visible acelera las reacciones Fenton ($\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{3+}, \text{Fe}^{2-}$) (Alberto Marinas Aramendia, 2007).

Los materiales semiconductores se pueden usar para foto sensibilizar la degradación de los contaminantes orgánicos (incluidos compuestos aromáticos y alifáticos) aunque ambientalmente solo unos pocos son los apropiados, entre ellos están, TiO_2 , ZnO , CdS , SrTiO_3 , CdTe , WO_3 , SnO_2 , ZnS , SnO_2 y CdSe . Se resalta el TiO_2 debido a que es fotoactivo en la región espectral de la luz solar o artificial, y químicamente inerte, es foto estable y sobre todo económico (Franco et 2015).

Objetivos

Objetivo general

- Documentar las técnicas, para el tratamiento de aguas residuales industriales, asociadas a procesos de fotocátalisis con aplicación en la remoción de metales pesados.

Objetivos específicos

- Reconocer los impactos a la salud y medio ambiente derivados de la contaminación de metales pesados en el cuerpo de agua, generados por el sector industrial.
- Identificar las variables que afectan de manera significativa los procesos fotocatalíticos.
- Analizar las diferencias entre fotocátalisis heterogénea y homogénea, así como su aplicación en el tratamiento de aguas residuales industriales.

Marco teórico

Contaminación ambiental

Es aquella que produce alteraciones al medio ambiente dañándolo de manera leve, grave, o destruyéndolo por completo, siendo nocivos para la salud, la seguridad o para el bienestar de la población, o bien, que puedan ser perjudiciales para la vida vegetal o animal. Se debe tener en cuenta el factor tiempo, ya que el daño puede ser temporal o continuo. La contaminación afecta al medio ambiente de distintas formas de acuerdo con los componentes principales: suelo, agua y atmosfera (Orellana, 2005).

Biodegradación

El medio ambiente y sus recursos tienen la capacidad de autodepuración o de realizar biodegradación de los contaminantes que se vuelcan en él. Esta capacidad es diversa en cada recurso natural, es decir, la capacidad de carga. Cualquier material orgánico puede ser degradado por medios biológicos, como plantas, animales, microorganismos y hongos, bajo condiciones ambientales naturales. Durante el proceso de biodegradación, el material será utilizado por los agentes biológicos como sustrato es decir, fuente de carbono y otros nutrientes (Orellana, 2005).

Capacidad de carga

Se llama capacidad de carga a la cantidad de contaminante que puede ser volcado al medio por unidad de tiempo y que dicho ambiente puede aceptar sin sufrir cambios apreciables en el transcurrir del tiempo (Orellana, 2005).

Metales pesados

Existen diferentes formas de definir este término, una de ellas es referida al peso atómico y lo define como un elemento químico comprendido entre 63.55 (Cu) y 200.59 (Hg); otra manera se refiere a los metales de densidad entre 4 g/cm³ hasta 7 g/cm³. Cabe resaltar que no todos los metales de densidad alta son especialmente tóxicos en concentraciones normales. Sin embargo,

hay una serie de metales pesados más conocidos por su tendencia a representar fuertes impactos al medio ambiente, el mercurio (Hg), el plomo (Pb), el cadmio (Cd), el talio (Tl), cobre (Cu), zinc (Zn) y cromo (Cr) son algunos de los más representativos por ser altamente tóxicos para el ser humano, la flora y la fauna (Ministerio para la transición ecológica , 2020).

La contaminación por las industrias, como la , minería entre otras y el uso indiscriminado de los fertilizantes químicos en la agricultura, generan una alta cantidad de metales pesados, que se incorporan a las fuentes hídricas, fauna, flora y alimentos cultivados, todo esto produce alteraciones en la cadena trófica, provocando riesgos potenciales en la naturaleza y en la sociedad, debido a los graves problemas que se originan en la salud humana y animal. El plomo, mercurio, cadmio, arsénico, son algunos de los metales pesados que se encuentran con regularidad y aumentan los índices de la problemática mencionada. Para el 2019 los estudios informaban que el planeta tenía de 400 a 1000 veces más plomo en los huesos comparado con lo reportado hace 400 años, debido a la presencia de este metal en alimentos y productos industriales. Estos metales, ocasionan graves daños en los órganos del cuerpo humano, especialmente el cerebro y capacidad mental de los niños (Londoño Franco , Londoño Muñoz , & Muñoz García , 2016).

Origen y distribución de los metales pesados

Los metales pesados se encuentran de manera natural en el ambiente en concentraciones que no causan perjuicio a las diferentes formas de vida. Estos no pueden ser degradados o destruidos, pueden ser disueltos por agentes físicos y químicos ó ser lixiviados. Algunos metales forman complejos solubles y son transportados y distribuidos a los ecosistemas hasta incorporarse en la cadena trófica (suelo, agua, plantas, semillas y forrajes), primordialmente aquellos procedentes de áreas contaminadas. En la (**Tabla 1**) se presentan las principales fuentes

de contaminación de metales en los alimentos (Londoño Franco , Londoño Muñoz , & Muñoz García , 2016).

Tabla 1

Principales fuentes de contaminación de metales en los alimentos

Origen contaminación	Metal pesado
Proveniente del suelo	Cadmio, bromo, flúor, cobre
Uso de insecticidas, desinfectantes y medicamentos	Arsénico, cobre, plomo, mercurio
Suelo arenoso y envases de vidrio	Silicio
Equipo de procesamiento	Cobre, hierro, níquel, estaño, plomo, zinc
Almacenamiento	Hierro, níquel, estaño, plomo, cadmio, estroncio
Por oxidación en el envase	Hierro, cobre
Debido al procesamiento	Cobre, cadmio, arsénico
Suplementos alimenticios en dietas de animales	Cobre, cadmio, hierro, zinc, arsénico

Fuente: (Gómez-gonzález et al., 2021)

Aguas residuales

Las aguas residuales son cualquier tipo de agua cuya calidad está afectada negativamente por la influencia antropogénica. Se trata de agua que no tiene valor inmediato para el fin que se utilizó ni para el propósito para el que se produjo debido a su calidad, cantidad o al momento en que se dispone de ella (Zarza, 2021).

Aguas residuales domésticas

Las aguas residuales domésticas se caracterizan por ser residuos líquidos de viviendas, zonas residenciales, establecimientos comerciales o institucionales. Estas, además, se pueden subdividir en: aguas negras, las cuales se caracterizan por ser aguas que son transportadoras de la orina y lo proveniente del inodoro. Las aguas grises que se caracterizan por ser jabonosas con alto contenido de grasas, proveniente de la ducha, la tina, lavaplatos, lavadero y lavadora (Pulido, Miranda , Guzman Guavita, & Molano, 2018).

Los análisis de muestras de estas aguas se realizan mediante unidades de medida tanto físicas como químicas (kg, % en masa, % en volumen, ml/l, mg/l, ppm, mol/l). Las características físicas más importantes del agua residual son el contenido total de sólidos, término que engloba la materia en suspensión, la materia sedimentable, la materia coloidal y la materia disuelta. Otras características físicas importantes son el olor, la temperatura, la densidad, el color y la turbiedad (MODULOS LIBROS , 2021).

Aguas residuales industriales

Son las aguas residuales originadas en instalaciones comerciales e industriales por sus procesos de fabricación, producción, transformación, consumo, limpieza o mantenimiento (**Tabla 2.**) Dentro de las industrias más generadoras de residuos se encuentran: sector textil, sector agroindustrial, sector químico, sector farmacéutico, sector de la automoción, sector de pieles y curtición y el sector papelerero (RECYTRANS , 2015).

La variedad de este tipo de residuos es muy grande y dependiendo de la industria generadora el líquido presenta unas características físicas y químicas distintas; se pueden presentar variaciones en las cantidades de nitrógeno, fósforo, cloruros, sulfatos, metales pesados (arsénico, cadmio, cromo, mercurio, plomo, zinc), entre otros, como también en las bacterias como (coliformes, salmonellas, virus), sin olvidar los principales parámetros como el pH, la

materia orgánica, DQO y DBO, el nitrógeno, el fósforo y los nitritos que también son indicadores de contaminación. Por lo tanto, es necesario la correcta caracterización de estas aguas para su correcto tratamiento y disposición (RECYTRANS , 2015).

Tabla 2.

Emisores directos en las aguas residuales por actividad.

Metal pesado	Industrias /Procedencia
Arsénico	Industrias del metal e instalaciones de calcinación y sintetización de minerales metálicos (22%) Industria química inorgánica de base o fertilizantes (20%) Producción de cemento y materiales cerámicos (18%) Plantas de procesado de residuos peligrosos (10%)
Cadmio	Industrias del metal e instalaciones de calcinación y sintetización de minerales metálicos (66%)
Cloruros	Plantas de combustión (40%) Industria química inorgánica de base o fertilizantes (30%)
Cromo	Industrias del metal e instalaciones de calcinación y sintetización de minerales metálicos (87%)

Cobre

Industria química inorgánica de base o fertilizantes (18%)

Industria Química Orgánica de base (12%)

Plantas de combustión (12%)

Cianuros

Industrias del metal e instalaciones de calcinación y sintetización de minerales metálicos (80%)

Industria Química Orgánica de base (10%)

Plomo

Industria química inorgánica de base o fertilizantes (15%)

Industria Química Orgánica de base (12%)

Refinerías de petróleo y gas (12%)

Zinc

Industrias del metal e instalaciones de calcinación y sintetización de minerales metálicos (33%)

Industria Química Orgánica de base (23%)

Industria química inorgánica de base o fertilizantes (16%)

Industria de la madera y papel (11%)

Fósforo

Industria química inorgánica de base o fertilizantes (25%)

Industria Química Orgánica de base (22%)

Industria de la madera y papel (18%)

Industrias lácteas, mataderos y otras (13%)

Fuente: (Rodríguez, 2016)

Características principales de las aguas residuales

Las aguas residuales están formadas aproximadamente por un 99% de agua y un 1% de sólidos en suspensión y en solución. Los residuos que forman la parte sólida son:

- Los sólidos en suspensión pueden tratarse de trapos, compresas, papeles, etc.
- Los sólidos que están diluidos en el agua pueden tratarse de residuos orgánicos como celulosa, grasa, jabones, o de residuos inorgánicos como nitrógeno, fósforo, sulfatos, etc.
- Sólidos inorgánicos que son sustancias tóxicas, como arsénico, mercurio, cromo, cadmio, plomo y zinc (RECYTRANS, 2013).

Tratamiento y depuración de las aguas residuales

Toda agua servida o residual debe ser tratada, tanto para proteger la salud del ser humano como para la preservación del medio ambiente. Antes de proceder al tratamiento de estas aguas se debe conocer su composición. Esto es lo que se denomina caracterización del agua y permite conocer qué elementos químicos y biológicos están presentes (ECURED, 2020).

Procesos de tratamiento de aguas residuales

Existen varias formas y métodos para tratar las aguas y de esta manera eliminar o reducir su composición dañina. Existen tratamientos que son económicos y fáciles de aplicar, algunos muy amigables con el medio ambiente y otros no tanto.

Tratamiento preliminar:

El objetivo de un tratamiento preliminar es retirar del agua residual aquellos sólidos suspendidos que por su naturaleza presentan interferencias en etapas posteriores del proceso, lo que puede realizarse de varias formas, las cuales veremos a continuación.

Tabla 3.*Objetivo de los procesos de pretratamiento*

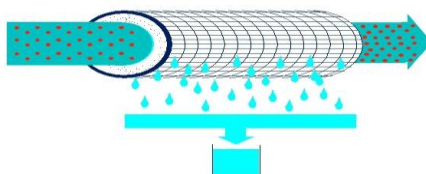
Proceso	Objetivo
Rejas o tamices	Eliminación de sólidos gruesos
Trituradores	Desmenuzamiento de sólidos
Desarenadores	Eliminación de arenas y gravilla
Desengrasadores	Eliminación de aceites y grasas
Preparación	Control de olor y mejoramiento hidráulico

Fuente: (Villanueva et al., 2013)**Procesos físicos o primarios.**

Estos, se basan en operaciones unitarias de separación en las cuales no se produce una alteración de la estructura química del contaminante, lo que permite la recuperación y en algunos casos la reutilización de los subproductos generados durante el proceso. En estos procesos encontramos:(Acosta, 2009)

Filtrados por membrana

Es un método de tratamiento hace que el residuo líquido pase por filtros de diferentes tamaños, eliminando componentes indeseables. Las membranas de filtración se catalogan de acuerdo con su tamaño (Ver ***Ilustración 1***).

Ilustración 1. Filtrado por membrana**Fuente:** blog fibras & normas S.A.S

Sedimentación primaria

La sedimentación es un proceso físico que aprovecha la diferencia de densidad y peso entre el líquido y las partículas suspendidas. Los sólidos, más pesados que el agua, precipitan produciéndose su separación del líquido.

Flotación

Es un proceso utilizado para la separación de partículas sólidas o líquidas en un medio líquido. En el tratamiento de las aguas residuales se utiliza para remover aceites y grasas. La separación se consigue por flotación simple o introduciendo burbujas muy finas (Collazos, 2008).

Osmosis inversa

También se conoce como hiperfiltración, es un tipo de membrana con poros abiertos con tamaño de 1 a 10 angstroms, al líquido se le hace presión para que pase por la membrana, reteniendo las sales disueltas, dejándola libre de ellas (Fibras y Normas de Colombia S.A.S., 2004).

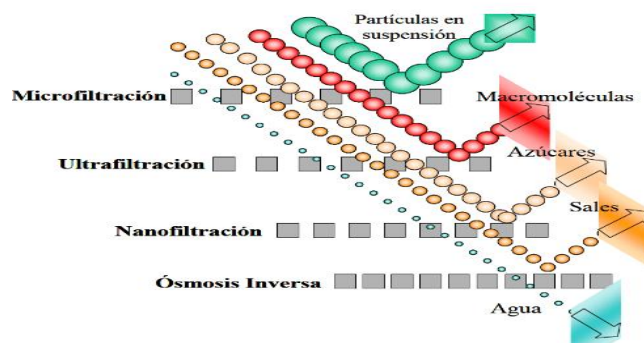
Filtración

Este proceso también utiliza membranas y puede realizarse por nano filtración, ultrafiltración y microfiltración. La diferencia entre estos es el tamaño de los poros (Ver **Ilustración 2**). La nanofiltración es usada en procesos industriales, el tamaño de los poros es de 10 a 100 angstroms, el tratamiento de agua hace que la nanofiltración separe del agua las sustancias orgánicas como los colorantes. El tamaño de los poros en la ultrafiltración es más pequeño y va desde 0,01 a 0,1 micras, en este tipo de filtración es posible eliminar bacterias y virus eficazmente. En la microfiltración los poros van de 0,1 a 1 mira y elimina los virus y

bacterias que en la ultrafiltración no se lograron retener (Fibras y Normas de Colombia S.A.S., 2004).

Ilustración 2

Filtración de aguas residuales



Fuente: blog fibras & normas S.A.S

Procesos biológicos o secundarios.

Son procesos biológicos empleados para eliminar la materia orgánica biodegradable. Pueden agruparse en procesos aerobios y anaerobios. En estos procesos se utilizan microorganismos para degradar la materia orgánica presente. En estos podemos encontrar:

Lagunas de estabilización

Es un proceso por el cual las aguas son vertidas en estanques de tierra impermeabilizados, generalmente extensos y poco profundos, donde son tratadas por métodos totalmente naturales. El oxígeno necesario en los estanques se obtiene por aireación natural a través de la superficie y de la reacción de fotosíntesis de las algas. El funcionamiento de las lagunas depende, fundamentalmente, de la temperatura, mezcla, características climáticas, pH, tiempo de retención hidráulico, profundidad de lagunas (Martelo & Lara Borrero, 2012).

Acción del carbón activado

En el tratamiento de agua la acción de filtros de carbón activado es muy eficiente para eliminar sólidos de gran peso y, además, hace posible la eliminación de olores desagradables, el color turbio y el exceso de cloro por procesos de cloración (Fibras y Normas de Colombia S.A.S., 2004).

Plantas macrófitas

Las plantas macrófitas son aquellas que pueden vivir y desarrollarse en medios acuáticos, hay algunas de estas plantas que posee la capacidad de eliminar agentes contaminantes (Martelo & Lara Borrero, 2012).

Ilustración 4.

Plantas macrófitas



Fuente: blog fibras & normas S.A.S

Lodo activado

Es una técnica de tratamiento biológico, en la que se agita y airea una mezcla de aguas residuales y lodo biológico; de forma que se consignan oxidaciones rápidas de la materia orgánica (Fibras y Normas de Colombia S.A.S., 2004).

Procesos químicos o terciarios

Son procesos que se utilizan para sustraer los contaminantes que no han sido eliminados en las fases de tratamientos anteriores. Son generalmente tratamientos un poco más caros que el resto debido a que eliminan contaminantes más específicos estos tratamientos son:

- Procesos electroquímicos
- Procesos de oxidación avanzada (POA)

Aplicación de electricidad al agua residual

Las nuevas tecnologías implementadas hacen posible remover los contaminantes presentes en el agua por medio de energía eléctrica. En este método se produce el peróxido de hidrógeno a través del oxígeno presente en el agua y se generan cargas eléctricas que hacen posible que el agua sea depurada y reinsertada a diferentes masas de agua como, los océanos y mares, sin que existan daños fuertes a los ecosistemas acuáticos (Fibras y Normas de Colombia S.A.S., 2004).

Procesos de oxidación avanzada

Los desechos líquidos industriales, presentan gran cantidad de compuestos químicos que alteran la estabilidad de los recursos suelo y agua. Actualmente, para la remoción de metales contaminantes, se ha desarrollado el proceso de oxidación avanzada, el POA se define como un conjunto de procedimientos fisicoquímicos diseñados específicamente con el objetivo de generar diferentes especies oxidantes como los radicales hidroxilos (OH^{\bullet}) y otras especies fuertemente oxidantes (O_2^{\bullet} , HO_2^{\bullet} y ROO^{\bullet}) que favorecen los procesos de oxidación y reducción in situ (Fitria, 2013).

Este procedimiento emplea la luz solar o artificial acompañado de un catalizador, que a través de una reacción química genera una oxidación y una reducción, para la degradación de

ciertos metales. De esta manera los POA son empleados como tratamientos terciarios en la descontaminación de aguas residuales industriales, ya que surgen como una práctica para la mineralización de los contaminantes, garantizando la disminución o remoción de las cargas orgánicas, la Demanda Química de Oxígeno (DQO), la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO).

Las principales ventajas de los POA sobre otras técnicas de tratamiento de aguas residuales son:

- Bajo costo.
- Ambiente limpio y sustentable.
- Tiempo de inactivación de microorganismos relativamente corto.
- Menor generación de lodos.
- Menor efecto residual toxicológico.
- Mineralización completa de compuestos contaminantes.
- Tratamiento de contaminantes en baja concentración.
- Formación mínima de subproductos o no se forman.

Semiconductores

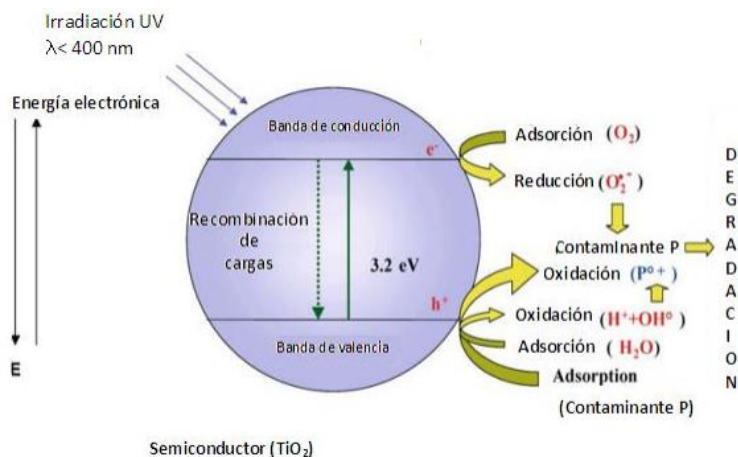
Los semiconductores constituyen una amplia clase de materiales cuya conductividad eléctrica cambia mediante la exposición a medios externos, ya sea la temperatura, radiación electromagnética o presión, comportándose como un conductor en algunos casos y como un aislante en otros (FRANCISCO JAVIER ONANDIA OSORES, 2017). Los semiconductores de interés en fotocatalíticos sólidos cristalinos generalmente óxidos como TiO_2 , ZnO , Fe_2O_3 , Cu_2O , CeO_2 , pero los semiconductores más utilizados en estos procesos de Fotocatálisis son el TiO_2 y CeO_2 . El TiO_2 es uno de los óxidos metálicos más estudiados por su actividad fotocatalítica y sus propiedades; es considerado no tóxico, resistente a la corrosión y biocompatible. Por esta razón ha sido empleado en diversos productos, desde protectores solares hasta en dispositivos complejos como celdas fotovoltaicas. Sus aplicaciones incluyen la degradación fotocatalítica de contaminantes, purificación de agua, biosensores, distribución controlada de fármacos, entre otras. El dióxido de titanio es un semiconductor cuyos defectos superficiales más comunes son vacantes de oxígeno que corresponden a electrones desapareados resultantes de haber sido transferidos desde un orbital 2p del oxígeno hacia la banda de conducción formada por orbitales 3d del Ti con la respectiva remoción del átomo de oxígeno. Es esta acumulación de electrones en la superficie del TiO_2 la que determina sus propiedades químicas, pues todos los procesos que ocurren en la superficie de los semiconductores se llevan a cabo para alcanzar un equilibrio entre el potencial del nivel Fermi y el potencial químico de los adsorbatos (Nevárez Martínez, Espinoza Montero , Quiroz Chávez, & Bunsho, 2017).

Fotocatálisis

Es un proceso que se basa en la absorción directa o indirecta de la luz, por medio de un sólido semiconductor de banda ancha como él (TiO_2). En la región interfacial entre el sólido excitado y la solución tienen lugar (Ver *Ilustración 5*) reacciones de destrucción o de remoción de los contaminantes sin que el catalizador sufra cambios químicos (Fitria, 2013). Cuando el semiconductor TiO_2 , es excitado con la luz se origina pares de electrón hueco, llevando varios procesos consigo, tales como, la migración de electrones a la superficie, los cuales reaccionarán con las especies absorbidas, generando procesos de oxidación y de reducción (Fitria, 2013).

Ilustración 5.

Diagrama explicativo del proceso de acción de la fotocatalisis empleando como catalizador TiO_2



Fuente: (Hernandez, 2012)

Beneficios de la fotocatalisis con el semiconductor TiO_2

El TiO_2 es el semiconductor más usado en fotocatalisis, debido a que es química y biológicamente inerte, no es tóxico, insoluble en el agua, es estable a corrosión fotoquímica y química, es abundante y económico, además posee un gap de energía de 3.2 eV que puede ser

excitado con luz UV de $\lambda < 387$ nm, la cual puede ser aportada por la luz solar (Rojas Higuera & Sanchez Garibello).

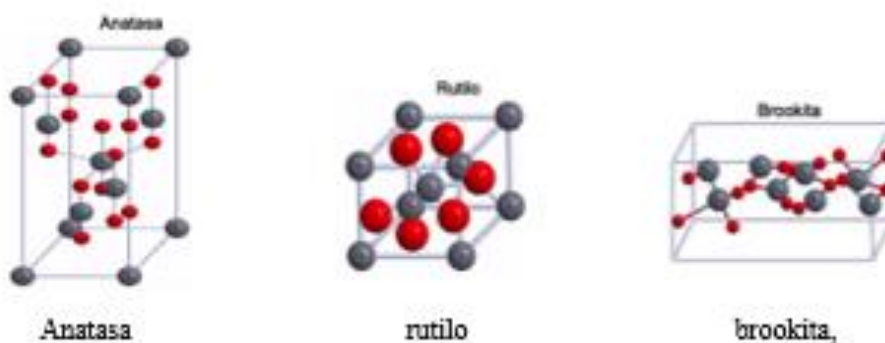
La fotocatalisis más el coadyuvante TiO_2 es un proceso que destruye sustancias toxicas, así como sustancias orgánicas y sustancias peligrosas, incluidas las mezclas complejas, estas sustancias serán eliminadas en un único proceso, sin necesidad de ser extraídas previamente (Rojas Higuera & Sanchez Garibello).

Características del Dióxido de titanio

El TiO_2 se encuentra en tres formas cristalinas: brookita, rutilo y anatasa (Ver **Ilustración 6**) siendo los dos últimos los más efectivos en tratamientos de aguas residuales (Hernandez, 2012). La anatasa es termodinámicamente menos estable que el rutilo, sin embargo, posee mayor área superficial y más alta densidad superficial de los sitios activos para la adsorción y la catálisis.

Ilustración 6.

Estructuras cristalinas del TiO_2



Fuente (Zarazua-Aguilar, 2017)

Factores que afectan el proceso fotocatalítica

Existen un gran número de factores que influyen en los procesos fotocatalíticos ya sean cualitativos o cuantitativos, los cuales resultan ser importantes para el resultado final, estos son:(Muñoz, 2012).

pH:

El pH afecta las propiedades superficiales del catalizador y a la forma química del compuesto que se desea degradar. El proceso de fotocátalisis es más eficiente en medio ácido ($3 \leq \text{pH} \leq 5$).

Características del catalizador:

Un buen catalizador debe tener una alta área superficial, una distribución de tamaño de partícula uniforme, forma esférica de las partículas y ausencia de porosidad interna.

Temperatura:

La velocidad de las reacciones que ocurran en el proceso fotocatalítico, no se modifica apreciablemente con la variación de la temperatura, este comportamiento es típico de reacciones iniciadas foto químicamente.

Intensidad de la radiación:

Este es uno de los factores más importantes ya que este proceso depende de la energía de los fotones incidentes, el dióxido de titanio absorbe longitudes de onda inferiores a 400 nm, que corresponden al espectro ultravioleta (Diebold, 2003).

Diseño del reactor:

Los parámetros derivados del diseño y del tipo de reactor, definen la óptica, distribución de luz y tipo de flujo, influyendo en el rendimiento del proceso.

Aditivos:

Determinadas sustancias pueden incidir de forma importante a la eficacia del proceso de fotocátalisis, ya sea inhibiendo o acelerando la velocidad de degradación del contaminante.

Algunos aniones inorgánicos como cloruros, sulfatos y fosfatos inhiben el proceso; otros, como nitratos y percloratos, apenas si tienen influencia sobre la velocidad. La inhibición se relaciona con la adsorción de dichos iones sobre el catalizador, que compite con la adsorción del contaminante especialmente cuando favorezcan la recombinación de pares (BETANCURT, 2014).

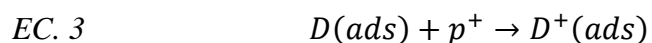
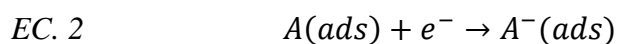
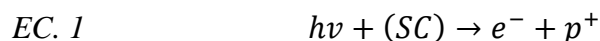
La técnica de fotocátalisis es utilizada para la descontaminación de aguas residuales debido a que este proceso de oxidación avanzada genera la degradación y mineralización de estos contaminantes. Lo más importante de este método de tratamiento es su bajo costo ya que utiliza una fuente inagotable: la radiación solar.

Fotocatálisis heterogénea

Es un proceso que se basa en la absorción directa o indirecta de energía radiante (visible o UV) por un sólido (el fotocatalizador, que normalmente es un semiconductor de banda ancha). En la región interfacial entre sólido excitado y la solución tienen lugar las reacciones de destrucción o de degradación de los contaminantes, sin que el catalizador sufra cambios químicos. Este proceso se lleva a cabo en 5 etapas, la primera es la transferencia de reactivos de la fase líquida a la superficie, seguido de la adsorción de al menos uno de los reactivos, como tercera etapa está la reacción en la fase adsorbida, luego la desorción de los productos para finalmente hacer la eliminación de los productos de la región de interface (Herrmann, 1999).

La activación, que se lleva a cabo en la tercera etapa, se rige por el siguiente proceso: al iluminar un catalizador con fotones que tienen una energía igual o mayor que su energía de gap se produce una absorción de fotones y la formación de gran cantidad de pares de electrón hueco, lo cual disocia en fotoelectrones libres en la banda de conducción y de huecos en la banda de valencia. (Herrmann, 1999) (Ver ecuaciones EC. 1EC. 2EC. 3).

De la misma forma, con la presencia de una fase fluida (gas o líquido), ocurre una adsorción espontánea de acuerdo con el nivel de energía de cada una de las sustancias que se adsorbe; se transfieren electrones hacia 26 moléculas aceptores, mientras tanto los huecos (+) se transfieren hacia moléculas donantes (Herrmann, 1999).



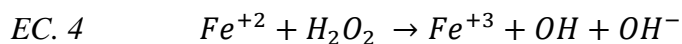
Nombra los números se muestra la excitación fotónica del catalizador parece ser el paso inicial de la activación de la totalidad del sistema catalítico. La energía del fotón está relacionada con la absorción del catalizador y no la de los reactivos (Herrmann, 1999).

El TiO_2 es uno de los óxidos metálicos más estudiados por su actividad fotocatalítica debido a sus propiedades, es considerado no tóxico, resistente a la corrosión y biocompatible. En presencia de radiación UV, las reacciones que suceden en su superficie permiten generar especies radiactivas como electrones (e^-) y huecos (h^+), que a su vez son capaces de provocar reacciones de reducción y oxidación, respectivamente en el medio circundante (Nevárez Martínez, Espinoza Montero , Quiroz Chávez, & Bunsho, 2017).

Fotocatálisis homogénea

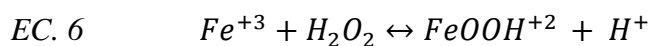
Este tipo de reacciones se basan en la descomposición del peróxido de hidrógeno en presencia de iones Fe^{+2} en medio ácido generando radicales hidroxilos (OH), los cuales poseen un alto poder oxidantes. Este tipo de reacciones se deben realizar a pH entre 2.5-3, puesto que a estas condiciones de acidez la principal especie presente en la reacción es $Fe(OH)^{+2}$ presenta la mejor absorción de luz y la mayor generación de radicales hidroxilos.

En la fotocatalisis homogénea las sales de hierro reaccionan con peróxido de hidrógeno para generar los radicales hidroxilos (Ver EC. 4 EC. 5) (López & Gutierréz Rojas , 2008).

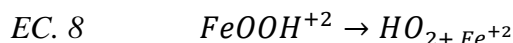


$$EC. 5 \quad K = 76.5 \text{ L mol}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

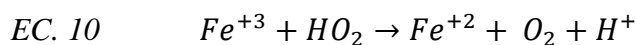
Luego el Fe^{+3} es reducido por la reacción con el exceso de H_2O_2 para obtener de nuevo Fe^{+2} y producir más radicales, esta regeneración da lugar a un mecanismo catalítico (Ver EC. 6 EC. 7 EC. 8 EC. 9 EC. 10 EC. 11).



$$EC. 7 \quad K_{eq} = 3.1 \times 10^{-3}$$



$$EC. 9 \quad K_{eq} = 2.7 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$$



$$EC. 11 \quad k < 2 \times 10^3 \text{ L mol}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

Esta generación de radicales hidroxilos permite que las concentraciones de Fe^{+2} a emplearse puedan ser de órdenes de magnitud menores que en la reacción de fotocatalisis

convencional. Estas reacciones ofrecen una degradación efectiva de contaminantes orgánicos con uno costos de operación bajos y ofrecen la posibilidad del aprovechamiento de energía solar.

El mayor beneficio de este proceso es que los reactivos empleados son seguros a la hora de su manipulación y lo más importante no generan afectaciones al medio ambiente. Fuera de esto, no se requiere maquinaria ni sistemas presurizados para el proceso de oxidación (López & Gutierrez Rojas , 2008).

Diferencias entre la Fotocatálisis Heterogénea y fotocátalisis Homogénea

Tabla 4

Diferencias entre la Fotocatálisis Homogénea y Fotocatálisis Heterogénea

Fotocatálisis homogénea	Fotocatálisis heterogénea
Reacción suave	Reacción fuerte
Separación del producto Difícil	Separación del producto fácil
Separación del catalizador Difícil	Separación del catalizador fácil
Recuperación del catalizador costoso	No requiere, recuperar catalizador
Estabilidad del catalizador, baja	Estabilidad del catalizador, alta
Tiempo de vida del catalizador, bajo	Tiempo de vida del catalizador, alto

El catalizador más utilizado Fenton

El catalizador más utilizado TiO_2

El oxidante o catalizador se presentan en disolución.

El catalizador no se encuentra en fase acuosa.

La excitación tiene lugar en una sola fase.

La excitación del semiconductor puede tener lugar de dos formas.

Los catalizadores moleculares pueden ser difíciles de sintetizar y su estabilidad es limitada.

El catalizador generalmente es estable y fácil de preparar.

Sirve para tratar contaminantes a bajas concentraciones (ppb)

Sirve para tratar contaminantes a bajas concentraciones (ppb)

Usualmente no genera lodos que a la vez requieren de un proceso de tratamiento

Es capaz de transformar químicamente el contaminante y conseguir su mineralización completa.

Fuente: Autor

Afectaciones a la salud y medio ambiente

Los metales pesados como cadmio y mercurio, reportados como principales contaminantes, de igual manera se han reportado otros metales como contaminantes como el cromo, cobalto, cobre, molibdeno, níquel, plomo, estaño, titanio, vanadio, zinc o plata; los cuales representan un riesgo para el medio ambiente, puesto que son sustancias con una gran estabilidad química ante los procesos de biodegradación, lo que hace que los seres vivos sean incapaces de metabolizarlos, generándose una contaminación por bioacumulación y un efecto multiplicador en la concentración del contaminante en la cadena trófica, esto se debe a que es altamente tóxico y tienen la capacidad de absorber a través de las membranas biológicas por su elevada afinidad química por el grupo sulfhídrico de las proteínas (Mancera Rodríguez & Álvarez León , 2006).

Las concentraciones de algunos de estos metales en el cuerpo humano ocasionan graves afectaciones a la salud, (**Ver Tabla 5**;Error! No se encuentra el origen de la referencia. acumulándose en tejidos, especialmente el riñón y pulmón, alterando sus funciones básicas y provocando neumonía, disfunción renal y enfisemas. Así mismo, se presentan intoxicaciones crónicas produciendo osteopatías que se relacionan con el metabolismo del calcio (Mancera Rodríguez & Álvarez León , 2006).

En las células, el cadmio se une a la metalotioneína, proteína que contiene 26 grupos sulfhidrilos libres por molécula, debido a la gran proporción de residuos de cisteína. La función principal de está micro proteína es la protección del sistema enzimático celular. Su síntesis en el hígado, riñón e intestinos es inducida por cadmio y se conoce por estudios experimentales que el complejo cadmio-meta-lotioneína es más tóxico para los túbulos renales que el mismo cadmio. Se ha demostrado también escasa capacidad del riñón para sintetizar la metalotioneína, lo que lo

hace insuficiente para fijar cadmio y da lugar a la aparición de las manifestaciones tóxicas (Mancera Rodríguez & Álvarez León , 2006).

El mercurio es uno de los elementos más mencionado por los efectos nocivos que produce en la salud pública, puesto que se ha demostrado las alteraciones neuro-fisiológicas particularmente en el desarrollo de los fetos y en los niños. En estudios realizados en la región caribe de Colombia, se han comprobado concentraciones altas de mercurio en peces, lo que produce la bioacumulación en forma de metilmercurio quedando disponible hasta llegar al ser humano por medio de la cadena trófica. El mercurio se acumula en sedimentos en la base de los cuerpos de agua, donde los microorganismos como bacterias que viven allí, pueden convertirlo a la forma orgánica metilmercurio, que es sacado por los gusanos y otros animales pequeños que viven en los sedimentos. Este compuesto se acumula en los peces que comen estos animales y en los peces más grandes que se comen a los peces más pequeños. De esta manera, el metilmercurio que es mucho más tóxico que otras formas de mercurio y que por su alta solubilidad en lípidos y su facilidad para atravesar membranas se distribuye a través de todo el organismo, finalmente, se acumula en los peces a concentraciones mucho más elevadas que las presentes en el agua (Londoño Franco , Londoño Muñoz , & Muñoz García , 2016).

Entre los años 1986 y 1999 evaluaciones del instituto colombiano de hidrología, meteorología y adecuación de tierras HIMAT y el instituto colombiano de geología y minería INGEOMINAS, encontraron en las aguas del río Magdalena (puerto Salgar, puerto Berrio, peñas Blancas, Maldonado, San Pablo, Calamar) metales en concentraciones tales como Pb (0,2-5,4 ppb), Hg (0,06-0,12 ppb), Cd (0,07- 16ppb), Fe (30-133 ppb) y Zn (9-23 ppb) (IDEAM, 2011) encontrándose en áreas con concentraciones muy altas con respecto a los valores en aguas naturales y los permisibles internacionalmente, y que deben ser mucho mayores en sedimentos y

organismos como los peces, donde se han detectado niveles de hasta 0,5 ppm/g, se encuentran evidencias del impacto ambiental causado por la minería de Cauca (Antioquia) dado que se encuentran reportes de concentraciones de mercurio metálico de 270 kg/día y hasta 9.553 ton/día de sedimentos (Consortio Carinsa-incoplán Ltda, 1993). Lo anterior se confirma con un reporte realizado en el año 2007 en el río Cuaca, donde detectaron contenido de mercurio en peces en concentraciones entre 104-125 ppb en músculos y 103- 248 ppb en hígados (Mancera Rodríguez & Álvarez León , 2006). Se han considerado límites máximos permisibles, propuestas por diferentes entidades; sin embargo, la OMS recomienda que el límite permisible es (0,5 µg/g)(Vargas Licona & Marrugo Negrete, 2019).

Sin embargo, la contaminación por mercurio y otros metales pesados es muy difícil de detectar a través del monitoreo medio ambiental, ya que las técnicas específicas de análisis son difíciles, costosas y solo pueden ser manejadas por laboratorios especializados y experimentados.

Adicionalmente, las concentraciones en el medio suelen ser más bajas que las encontradas en los sedimentos, o en las especies de fauna y flora presentes en los cuerpos de agua, por esto en ocasiones un nivel bajo de contaminación en la columna de agua no necesariamente indica contaminación baja.

Tabla 5

Afectación a la salud humana y medio ambiente por los principales metales pesados.

Metal pesado	Afectación a la salud humana	Afectación al medio ambiente
Cadmio	Anemia, disfunción renal, cálculos renales, osteoporosis,	Se le reconoce como uno de los metales pesados con mayor

	<p>trastornos respiratorios, hipertensión, trastornos nerviosos, cefalea, vértigo, alteración del sueño, pérdida de peso, cáncer de próstata y pulmón, neumonitis y edema pulmonar.</p>	<p>tendencia a acumularse en las plantas. El cadmio causa severos desequilibrios en los procesos de nutrición y transporte de agua en las plantas.</p>
<p>Arsénico</p>	<p>Causa lesiones en piel (queratosis, hiperqueratosis, hiperpigmentación) y lesiones vasculares en sistema nervioso e hígado, fiebre, hepatomegalia, melanosis, arritmia cardíaca, neuropatía periférica, anemia y leucopenia</p>	<p>El arsénico puede penetrar en el aire, el agua y el suelo a través de tormentas de polvo y aguas de escorrentía, por lo que la contaminación por arsénico está muy extendida debido a su fácil dispersión ocasionando que se incorpore a la cadena alimenticia de los humanos.</p>

Cobre

La exposición aguda por ingestión del sulfato de cobre puede producir necrosis hepática y muerte. La exposición crónica de alimentos conservados en recipientes de cobre genera lesión hepáticas en niños. No existe evidencia de efectos cancerígenos del cobre.

Cuando hay mayor presencia geológica natural de arsénico, se pueden encontrar altos niveles en aguas subterráneas. En animales puede presentarse problemas gastrointestinales, parálisis, ceguera y eritema cutáneo en animales albinos.

En concentraciones altas el cobre es tóxico para los organismos, y su efecto es fuerte en plantas y peces. En plantas produce lesiones en las raíces, inhibe el crecimiento radicular y promueve la formación de raicillas secundarias cortas y de color pardo. También produce clorosis. En algas y hongos previene la germinación de esporas. En peces, los iones de

Mercurio

La intoxicación crónica por mercurio se presenta temblores, hipertrofia de tiroides, taquicardia, gingivitis, cambios en la personalidad, eretismo, pérdida de memoria, depresión severa, daño renales, delirios y alucinaciones.

cobre interrumpen la regulación del sodio

Representa una fuente compleja de impactos ambientales que generan efectos nefastos en los cuerpos de agua, generando consecuencias negativas en la fauna acuática, ocasionando un desequilibrio en el medio ambiente.

Plomo

Provoca retraso del desarrollo mental e intelectual de los niños, causa hipertensión y enfermedades cardiovasculares en adultos. Los efectos agudos en sistema nervioso central consisten en parestesia, dolor y debilidad muscular, crisis hemolítica-anemia grave y hemoglobinuria. También afecta riñones, puede causar la muerte.

Presenta alteración en el suelo, afectando el desarrollo de los microorganismos, los vegetales y fauna subterránea, además genera desequilibrio en las características, químicas físicas y biológicas del aire y aguas (subterráneas o superficiales) En animales se ha demostrado efecto tóxico sobre los gametos y aumento de la concentración de plomo en sangre materna, que reduce la duración de la gestación y de peso al nacimiento de las crías

Fuente:(Bose & Chakraborty, 1957)

Estado del arte

Existen varios estudios sobre la aplicación de los sistemas fotocatalíticos para la descontaminación de las aguas residuales, estos estudios revelan el grado de mineralización y efectividad.

(Pavas, 2006) En su investigación maneja sistemas fotocatalíticos para la destrucción de compuestos orgánicos y otras sustancias en fuentes hídricas. En su estudio se evaluó la tecnología de óxido reducción fotocatalítica en la destrucción de contaminantes presentes en las aguas residuales industriales contaminadas con colorantes del teñido de hilos, plaguicida ácido 2-4 D y aguas residuales de una industria de bebidas isotónicas. Como resultados se obtuvieron: Que para el caso de las aguas residuales de la fábrica de hilos, no fue posible la degradación total de la carga contaminante debido a que el agua contiene distintos componentes además de los colorantes como detergentes, auxiliares, estabilizadores de pH y otros aditivos. Lo que contribuyó a que el proceso de degradación fuera más lento y que fuera necesario inyectar H_2O_2 como coayudante en la oxidación, logrando un porcentaje de degradación de 78.07%. para Fotocatálisis Heterogénea y Fotocatálisis Homogénea, se encontraron diferencias mínimas, por lo cual es difícil determinar cuál de los dos procesos fotocatalíticos es más eficiente en términos de porcentaje de decoloración, biodegradabilidad y disminución de carbono orgánico total (Pavas, 2006).

(Garcés Giraldo , Mejía Franco , & Santamaría Arango) Ellos en su investigación denominada “La fotocatalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales”. Explican los conceptos relacionados con los procesos de oxidación avanzada (POA), las reacciones, semiconductores, catalizadores y demás conceptos relacionados. Esta investigación concluyó que los procesos de oxidación permiten destruir una gran variedad de compuestos tóxicos que son

persistentes a la degradación natural. De los procesos avanzados de oxidación, dos tecnologías foto oxidativas son prometedoras en el tratamiento de aguas residuales: la fotocatalisis heterogénea mediada por semiconductores y la fotosensibilización con ion férrico (Garcés Giraldo , Mejía Franco , & Santamaría Arango).

(Rojas Higuera & Sanchez Garibello) Evaluaron la efectividad de la fotocatalisis heterogénea con TiO_2 para la inactivación de *Escherichia coli*. En este estudio realizó un tratamiento fotocatalítico en muestras del afluente de la planta de tratamiento de agua residual de Subachoque, mostrando como resultado, que el proceso de fotocatalisis heterogénea, con TiO_2 a temperatura 450°C , y una fuente de radiación de luz UV (254 nm) logra como resultado el 100% de inactivación de *E. coli* (Rojas Higuera & Sanchez Garibello).

(Perilla, 2017) Evaluó los sistemas fotocatalíticos con $\text{CeO}_2/\text{TiO}_2$ para el tratamiento de aguas residuales domésticas provenientes del río arzobispo. El objetivo de este estudio fue dar respuesta a los problemas de calidad del agua y sus efectos en el medio ambiente y la salud de la población a través de tres ejes preferentes: el tratamiento y distribución del recurso, la calidad de vida y la gestión de los riesgos y la gobernanza. En este estudio se planteó la utilización de procesos de oxidación avanzada (POA): como fotocatalisis, haciendo énfasis en aspectos fisicoquímicos, microbiológicos y toxicológicos involucrados en dichos procesos, con esta investigación se pudo indicar que gracias al aumento de la concentración de CeO_2 y la síntesis entre $\text{CeO}_2/\text{TiO}_2$ se evidencio un 80% de degradación de DQO, COT e inactivación de *Escherichia coli* (Perilla, 2017).

(Castiblanco Moreno & Perilla Perez, 2019) . Ellos dentro de su investigación tenían como propósito el uso de la fotocatalisis heterogénea con dióxido de titanio (TiO_2), ya que es el tratamiento físico químico más utilizado para efluentes contaminados con cromo hexavalente.

Los resultados arrojaron que el pH ejerce un importante efecto en la velocidad de degradación del cromo, ya que en el pH más ácido la velocidad de degradación es más rápida; lo que confirma la teoría de que los procesos fotocatalíticos son más eficientes en medios ácidos entre $3 < \text{pH} < 5$. En este estudio, se encontró que la velocidad de degradación creció, cuando la intensidad de radiación se aumentó, (24 mW/m^2) en 1.5 días, es decir, a mayor intensidad de radiación la remoción es más rápida (Castiblanco Moreno & Perilla Perez, 2019).

(Pinedo Hernández et al., 2017), Realizó una investigación, basada en la remoción de mercurio proveniente de empresas mineras de la región. “Optimización del pH y la concentración de TiO_2 para la remoción de mercurio en un sistema fotocatalítico de recirculación iluminado con lámparas UV” la cual arrojó datos muy interesantes, con respecto a las variantes de pH y a las concentraciones de TiO_2 . La máxima eficiencia de remoción obtenía, fue de 98,53% a un pH de 6,98 y una concentración de TiO_2 de 0,51 g/L. Lo que confirma que a mayor concentración de TiO_2 , mayor porcentaje de remoción esto debido a que representa mayor superficie de contacto entre el catalizador y el Hg, lo que permite una adecuada adsorción, generando así la cantidad requerida de pares electrón hueco necesarios para que se presenten los procesos de óxido-reducción a una velocidad de reacción razonable. Sin embargo, se determinó que a mayores concentraciones de TiO_2 se aumenta la turbidez, debido a la presencia de mayor cantidad de partículas del catalizador, lo que dificulta la difusión de la radiación ultravioleta (Pinedo Hernández et al., 2017).

(Mera Benavides & Guarín Lianes, 2011) . Hicieron referencia de la fotocatalisis heterogénea con TiO_2 para el tratamiento de desechos líquidos con presencia del indicador verde de bromocresol, para determinar la degradación y mineralización de este mismo. Se aplicó un tratamiento con dióxido de titanio Degussa P-25 como catalizador, un reactor tipo Batch, y

radiación UV artificial con una longitud de onda de 360nm, obteniendo un porcentajes máximos de degradación de 99.38% y de mineralización de 87.5% al utilizar 300 ppm del catalizador TiO₂ Degussa P-25. En sus resultados se evidencia que el proceso de fotocátalisis heterogénea puede ser útil en el tratamiento de efluentes que tengan la presencia de bromocresol, o puede ser viable para ser aplicada a otros residuos que posean indicadores o colorantes con características iguales o similares al verde de bromocresol (Mera Benavides & Guarín Lianes, 2011).

(Giratá Sastoque, Guevara Rodríguez, & Machuca Martínez , 2011). Realizaron un estudio exploratorio en el tratamiento de vinazas mediante fotocátalisis solar con dióxido de titanio en un reactor de película descendente. En este estudio se evaluó el comportamiento del tratamiento Fotocatalítico para diferentes condiciones de operación tales como concentración inicial de catalizador, el pH inicial y el factor de dilución de vinaza, en un reactor solar de película descendente a escala piloto. La degradación por fotocátalisis heterogénea en el tratamiento de vinaza se cuantificó con el seguimiento del carbono orgánico total, los sólidos totales y la turbidez. En promedio se obtuvo una reducción en el carbono orgánico total de 12,33%. Sin embargo, se aumentaron los sólidos totales y turbidez de 12,93% y 16,50%, respectivamente. Estos resultados se obtuvieron a pH ácido, a concentración inicial de dióxido de titanio de 0,8 g/L y concentración de vinaza del 10% (Giratá Sastoque, Guevara Rodríguez, & Machuca Martínez , 2011).

(Franco, 2001). En su investigación evaluó un tratamiento para la remoción de los iones mercurio y cromo, presente en los desechos químicos de los laboratorios del centro de investigaciones ambientales e ingeniería y de ingeniería Sanitaria y Ambiental. Se realizó usando un sistema compuesto por un recipiente de acrílico de ocho litros, una bomba de recirculación, una lámpara de luz ultravioleta y un regulador de flujo. Se tomaron muestras 12 litros de los dos

laboratorios 12 litros realizando 3 réplicas de aproximadamente 4 litros cada una, se les agrego 150 mg/l de TiO_2 por último se les ajusto un pH de 7 y se colocaron debajo de las lámparas de luz ultravioleta.

Los resultados indicaron que el porcentaje de reducción del cromo y del mercurio no fue semejante en la fotocatalisis de los 5 experimentos que se realizaron, esto se debe a que la composición de concentración de los contaminantes en los 5 experimentos no son iguales, aunque a pesar de la gran desviación estándar de los resultados de la fotocatalisis, la disminución del cromo y del mercurio fue por arriba del 60% (Franco, 2001).

(Rubiano et al., 2005). Evaluó la aplicación de la fotocatalisis heterogénea en los procesos de remoción de fenoles. Los fenoles son compuestos que se absorben rápidamente por la inhalación del vapor, en contacto con la piel y por ingestión, provocando alteraciones en el sistema nervioso central, el corazón y el riñón, dando lugar a convulsiones, fallos respiratorios, colapsos, estado de coma e incluso la muerte. Las principales fuentes de contaminación de estos compuestos se producen en la industria farmacéutica, concretamente durante el proceso de fabricación del ácido acetilsalicílico (aspirina), y en la producción de resinas fenólicas.

Se estudió, la remoción de fenoles por medio de la fotocatalisis en donde se pudo concluir que las condiciones de pH del medio acuoso, tienen una influencia significativa en la velocidad y en el porcentaje de degradación de los fenoles, las propiedades del semiconductor son relevantes, puesto que es donde inicia el proceso fotocatalítico adicionalmente se concluye que para una mejor degradación de los fenoles es importante el uso de agentes oxidantes (Rubiano et al., 2005).

(Hincapié-Mejía et al., 2011). En su estudio, se analizó la aplicabilidad de Fotocatalisis para el tratamiento de aguas de lavado de la producción de biodiesel. El proyecto consistía en la

utilización de las tecnologías avanzadas de oxidación en este caso, fotocátalisis heterogénea y foto-Fenton, para así poder comprobar su viabilidad en el tratamiento de las aguas residuales provenientes de dichos procesos. El agua recolectada fue caracterizada por medio de parámetros fisicoquímicos, tales como demanda química de oxígeno, carbono orgánico total, demanda bioquímica de oxígeno, turbiedad, color, pH, conductividad, alcalinidad, contenido de detergentes y metanol así como toxicidad. Las variables evaluadas fueron pH (3 y 9) y el catalizador TiO_2 . Se pudo demostrar que el proceso de fotocátalisis heterogénea removió a pH altos el 60% y del 54% de DQO y del COT además se validó que esta tecnología, necesita de muchas variables para una buena degradación, como el manejo de pH y la concentración del catalizador. Mientras que con la tecnología foto-Fenton se obtuvieron mejores valores de la degradación de los contaminantes presentes en las aguas residuales de lavado de biodiesel (Hincapié-Mejía et al., 2011).

(Muñoz, 2012). Evaluó, la aplicación de Fotocátalisis heterogénea para el abatimiento de tensoactivos aniónicos en aguas residuales, ya que estas sustancias han sido de especial interés en temas de tratamiento de aguas residuales, porque sus concentraciones tienden a ser altas, afectando las propiedades de las etapas de tratamiento convencional, además de afectar procesos de tipo biológico en cuerpos de agua receptores. En este proceso se empleó la radiación UV de una lámpara germicida de 36 W, peróxido de hidrógeno H_2O_2 como agente oxidante y hierro trivalente Fe^{3+} como catalizador. Finalmente, el tratamiento fotocatalítico de aguas residuales compuestas por tensoactivos aniónicos demostró ser efectivo, ya que obtuvo un porcentaje de degradación y mineralización del 72% y 65% además se validó que las condiciones óptimas de tratamiento obtenidas fueron: pH 2,8; 4 ppm de Fe^{3+} y 500 ppm de H_2O_2 (Muñoz, 2012).

(Papamija & Sarria, 2010). Evaluaron la utilización de diferentes técnicas como, la fotocatalisis para la eliminación de ibuprofeno, empleando dióxido de titanio, analizando el efecto de la cantidad de catalizador en suspensión a concentraciones de (0, 50 y 200 mg/L de TiO_2), al final ellos pudieron concluir que la cantidad de TiO_2 tiene un efecto en la fotodegradación de ibuprofeno y que el mejor valor en el rango evaluado fue de 50 mg/L. Con esta cantidad de TiO_2 se alcanzó un porcentaje de fotodegradación de 80.64% en un tiempo igual a 240 minutos. También verificaron, la importancia que tiene la concentración inicial del contaminante ibuprofeno como un factor determinante en la fotodegradación (Papamija & Sarria, 2010).

(Restrepo et al., 2008). Análisis del uso de tecnologías como fotocatalisis en aguas residuales industriales empleando energía solar, estudiando la influencia de tres variables en la eficiencia de descontaminación o remoción de contaminantes acuosos provenientes de una industria de productos químicos, como la cantidad de H_2O_2 , volumen de agua a tratar y cantidad de TiO_2 . Las características de las aguas industriales a estudiar contaban con pH 2.8 -8.4, DQO (mg/L) 5116 -15283 y DBO (mg/L) 2900 -9192.

Al final se logró concluir que la Fotocatalisis Heterogénea es una tecnología viable para el tratamiento en etapas previas a un tratamiento biológico ya que se alcanzaron porcentajes de reducción en la DQO entre 6 y 46% y se obtuvieron efluentes biodegradables en todas las pruebas realizadas, también se validó que la adición de peróxido de hidrógeno contribuye a mejorar la eficiencia del proceso de oxidación de los contaminantes (Restrepo et al., 2008).

(Espinosa & Mera, 2015). Trataron aguas provenientes de los procesos de análisis de suelos agrícolas, análisis bromatológicos, entre otros. Dichos efluentes se caracterizan por la

generación de residuos peligrosos, dentro de éstos, el cromo hexavalente lo que los hace de especial interés para ser tratados y evaluados con procesos de oxidación avanzada. En este estudio evaluaron dos alternativas, el primero fue empleando TiO_2 como catalizador y la segunda fue con bioadsorción utilizando cáscara de plátano verde como bioadsorbente, las dos alternativas se manejaron a los mismos pH 1.5. Se pudo concluir que la fotocatalisis heterogénea y la bioadsorción son alternativas que contribuyen a una gestión ecológicamente racional de los residuos peligrosos, disminuyendo los efectos negativos del Cr sobre la salud humana y el ambiente. Aunque el porcentajes de remoción de bioadsorción fueron de $99,94 \pm 0,01$ %, y los resultados de la aplicación de la Fotocatalisis heterogénea fue de $96,07 \pm 0,65$ % respectivamente, siendo mejor la bioadsorción por presentar la mejor media y por último la mejor viabilidad técnica y ambiental se obtuvo para la bioadsorción con un 89% comparado con un 62% de la fotocatalisis (Espinosa & Mera, 2015).

El departamento de Risaralda, es reconocido por el sector manufacturero más grande de Colombia, siendo el desarrollo económico más importante de la región. Actualmente en la industria textil el 60% de los colorantes tienen propiedades y características no solubles, generando un gran impacto al medio ambiente. Es allí donde nace la importancia de la degradación de ciertos colorantes textiles como el colorante Amarillo Novacron LS-4G, por medio de dos procesos, fotocatalisis heterogénea utilizando TiO_2 y fotocatalisis homogénea por foto-Fenton (CARVAJAL, 2013) en este ensayo, se evaluó la eficiencia de estos dos procesos, para la fotocatalisis heterogénea, se manejaron tres pH diferentes (4, 8, 11) y tres concentraciones de catalizador H_2O_2 en 200, 300, 500 ppm, mientras que para la fotocatalisis homogénea se manejaron pH (3, 4, 6) con concentración de H_2O_2 en 200, 300, 500 ppm. En los dos ensayos se tuvieron remoción del colorante Amarillo Novacron LS-4G, y se demostró que

por medio de la fotocatalisis homogénea (foto-Fenton), hubo mejores condiciones, ya que la mayor degradación se obtuvo en un tiempo de 80 min a un pH de 3, obteniendo una degradación de 99,82 % y 91,16 % en la desaparición del colorante. Mientras que con la fotocatalisis heterogénea el tiempo fue mayor 200 min a un pH 4 y degradando el 99% de los contaminantes (CARVAJAL, 2013).

(BETANCURT, 2014), Realizo de forma artesanal un reactor para la degradación por fotocatalisis homogénea de 1-hidroxi-4-metilbenceno. Este compuesto fue escogido por ser altamente toxico (irritaciones, vómitos, problemas cardiacos y la muerte) y por encontrarse en productos cotidianos de limpieza (desinfectantes). En esta investigación se tuvo en cuenta las posibles combinaciones de los parámetros a evaluar como: pH, (2,5, 3 y 3,5) concentración de H_2O_2 (300, 500 y 700 ppm) y $FeSO_4$ (30, 40 y 50 ppm) al final se dedujo que las mejores condiciones para la degradación de 1-hidroxi-4-metilbenceno por fotocatalisis homogénea son con pH acido (2,5) y concentración (H_2O_2) de 700 ppm y ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$) de 40 ppm ya que se alcanzó un porcentaje de degradación del 98% en 5 horas que fue lo que duro el estudio (BETANCURT, 2014).

Por su eficiencia y costo, los estudios de fotocatalisis, también se han realizado en otros países. (Chacón, 2002). Habla en su investigación sobre el tratamiento de agua residual proveniente de la industria textil mediante fotocatalisis solar, determinando que la fotocatalisis homogénea (foto-Fenton) es más eficiente que el proceso heterogéneo (TiO_2/UV) en la eliminación del contaminante y esto se debió a menor tiempo y mayor porcentaje de remoción. Con base en los aportes destacados en esta revisión se evidencio que para la degradación de los colorantes se han utilizado hasta la fecha diferentes procesos avanzados de oxidación ya sea: O_3/UV , H_2O_2/UV y fotocatalisis heterogénea así como tratamientos combinados de fotocatalisis

y oxidación, dando como resultado una exitosa disminución de la concentración de colorante en los efluentes. Pero a pesar de esto hay ciertos limitantes, Por ejemplo, el uso de partículas de semiconductor en suspensión, requiere de una etapa adicional de separación del catalizador, de igual forma la utilización de fuentes artificiales de radiación ultravioleta (UV) puede ser un obstáculo para el escalamiento de la tecnología ya que eleva los costos de cada tratamiento.

Adicionalmente se demostró que la degradación de colorantes transcurrió más lentamente durante el proceso utilizando TiO_2 como catalizador. Siendo así que después de 360 minutos la disminución en la concentración de colorante fue de apenas 6%. Por el contrario, bajo condiciones foto-Fenton la reacción de degradación se verificó mucho más rápidamente. En este caso, a las condiciones de trabajo utilizadas, fueron necesarios apenas 18 minutos para conseguir la remoción de más del 95% del colorante (Chacón, 2002).

(Cortez, 2018). Se evaluó la opción de un tratamiento no convencional para la eliminación de ibuprofeno y diclofenaco, presentes en aguas residuales hospitalarias a través de la fotocatalisis. El estudio se realizó con dos compuestos dado que se detectó que el ibuprofeno y diclofenaco en concentraciones altas, pueden ser consideradas como peligrosas. La parte experimental del estudio fue elaborada para diferenciar la capacidad de remoción de la fotocatalisis heterogénea y la fotocatalisis homogénea, en los dos procesos se utilizó luz ultravioleta y peróxido de hidrógeno. Se detectó que la Fotocatalisis homogénea, logro remover casi el 95,19 % de diclofenaco y de forma parcial 32,45 % de ibuprofeno, también se evaluó la degradación simultánea de ambos fármacos, donde se pudo descomponer hasta niveles inferiores a los considerados como peligrosos. En el caso de la fotocatalisis heterogénea con TiO_2 a un pH de 3, se pudo degradar el ibuprofeno al 55.90% y el diclofenaco al 96% (Cortez, 2018).

(Fillat, 2018) Estudió, la posibilidad de remoción del cianuro encontrado en los desechos líquidos, lo cual ha generado gran preocupación, ya que el cianuro representa una sustancia de alta toxicidad para el medio ambiente y la salud humana.

Analizando 3 procesos, primeramente el proceso que consiste en el empleo de solo radiación UV-C, manejando un pH de la disolución: < 10 , el segundo con la implementación solo H_2O_2 y por ultimo un proceso de sistema combinado $H_2O_2/UV-C$, estos dos últimos manejaron pH de la disolución de 12. Los resultados arrojaron que en el primer proceso se requirió un tiempo de 50 minutos de exposición a la radiación UVC con una eficiencia de 1.73%, mientras que en el segundo proceso se requirió un tiempo de 110 minutos de exposición y un volumen de 10 mL de H_2O_2 , alcanzando un 75.62% de eficiencia, finalmente en el tercer proceso se requirió un tiempo de exposición $H_2O_2/UV-C$, de 110 minutos y un volumen de 10 mL de H_2O_2 para alcanzar la máxima degradación del cianuro la cual fue 98.7% de eficiencia (Fillat, 2018).

(Esmeralda et al., 2015). En el desarrollo de su tesis, se deseaba validar la síntesis y caracterización de dióxido de titanio (sol-gel) modificado con ácido bórico, empleando como catalizadores (B/TiO_2) y (TiO_2) para la degradación de una sal de sodio llamada, rojo Congo. El catalizador de TiO_2 puro, se preparó por el método sol-gel, el cual es un proceso químico, el "sol" (o solución) gradualmente evoluciona hasta formar un sistema difásico parecido a un gel, que contiene una fase líquida y otra sólida. En el caso del material B/TiO_2 se preparó de forma idéntica que el material TiO_2 puro, hasta la etapa de $Ti(OH)_4$ seco. El polvo de hidróxido de titanio se puso en contacto con una solución de ácido bórico en la cantidad necesaria para

introducir 3.7% peso teórico de boro en el material final, el hidróxido de titanio modificado se secó y calcinó de la misma forma que el material TiO_2 .

En la reacción foto-catalítica ambos materiales mostraron actividad, aunque el material dopado con boro (B/TiO_2) desarrolló una mayor velocidad de degradación que el TiO_2 ; esto debido a una mayor área específica; sin embargo, a los 100 minutos de radiación, la concentración con ambos materiales tiende a igualarse, lo cual indica que aunque la actividad con TiO_2 es más lenta tiende a equiparar al B/TiO_2 y que ambos materiales deben llevar a producir un intermediario de reacción muy estable que impide lograr la total degradación (Esmeralda et al., 2015).

(César et al., 2015). Elaboro una película, mediante el proceso Sol – Gel (el sol-gel es una ruta química que inicia con la síntesis de una suspensión coloidal de partículas sólidas o cúmulos en un líquido (sol) y la hidrólisis y condensación de éste sol para formar un material sólido lleno de solvente (gel). En este caso, se realizaron pruebas con diferentes pH de 3, 7 y 10.6 y utilizando el catalizador TiO_2 . Al terminar el análisis concluyo que a niveles de pH neutro, la constante de reacción disminuyó, mientras que con niveles de pH ácido, fue mayor la velocidad de reacción, la eficiencia de remoción que se obtuvo fue hasta 90 % y los subproductos cuantificables fueron removidos hasta niveles no detectables (César et al., 2015).

(Tapia et al., 2002). Propone una metodología para disminuir la concentración de Cr (VI) presente en efluentes de curtiembre sin tratamiento previo. La propuesta se basó en un proceso fotocatalítico donde se irradió el efluente por un determinado tiempo con luz ultravioleta en presencia de óxido de titanio como catalizador, empleando como agente reductor formaldehído. Durante el proceso se midió durante 29 horas el pH y la concentración de cromo total presente en

el efluente. Se obtuvo que el proceso fotocatalítico en este caso, permite en forma simultánea disminuir la cantidad de materia orgánica presente en un efluente, al ser ésta utilizada como agente reductor en el proceso de reducción del cromo hexavalente, además la aplicación de la fotocatalisis al efluente de curtiembre, permite aumentar significativamente la velocidad de reducción de Cr (VI) a Cr(III), lo que contribuyó a disminuir su concentración en los cuerpos de agua, también se encontró que las condiciones óptimas para reducir 50 ml de Cr(VI) de 100 mg/L, fueron a pH 2, con un tiempo de irradiación de 20 minutos y 40,0 mg de TiO₂, logrando para el sistema modelo un 97,8 % de reducción de Cr(VI) y para el efluente de curtiembre un 81,3 % (Tapia et al., 2002).

(Assadi et al., 2012). Analizó la reducción fotocatalítica de Cr (VI) a Cr (III) en soluciones acuosas bajo irradiación con UV y ZnO. Este estudio demostró que el cromo hexavalente en soluciones acuosas se puede reducir eficazmente al estado trivalente utilizando ZnO como fotocatalizador semiconductor bajo irradiación UV en la presencia de H₂O₂ como reactivo reductor. Se encontró que el efecto del pH sobre la reducción de Cr (VI) por el proceso UV / ZnO era diferente ya que a mayor pH (7 a 8) era más baja la efectividad de remoción y a un pH más ácido era mejor su efectividad de remoción, es decir que para el proceso fotocatalítico UV/ZnO la reducción de Cr (VI) fue más eficaz a un pH en el rango de 4 a 5, lográndose una conversión máxima del 70% (Assadi et al., 2012).

En los últimos diez años, las investigaciones de los procesos de oxidación avanzada han crecido de forma exponencial y esto se debe a su gran eficiencia en remoción de material pesado así como su bajo costo.

(Egziabher & Edwards, 2013) Realizaron una evaluación ambiental para tratar aguas contaminadas por medio de la fotocatalisis con TiO₂ y así poder degradar los antibióticos

presentes. Esta evaluación se realizó con el fin de mejorar calidad del efluente de salida una vez realizado el tratamiento primario y biológico en las estaciones depuradoras de aguas residuales urbanas con la finalidad de minimizar el impacto asociado al efluente en el medio receptor. El agua a tratar se encuentra a temperatura ambiente y tiene un pH neutro, se dividió en reactores cada uno con luz propia, en donde se obtuvo, la eliminación del 80% y el 100% de los antibióticos. Aparte realizaron un proceso de bioabsorción en donde se concluyó que la eliminación de los antibióticos es más elevada gracias a la unificación de estos dos procesos (fotocatálisis heterogénea y adsorción) esto gracias al carbón activo (Egziabher & Edwards, 2013).

(Gabriel & Perez, 2019) Realizaron un estudio para la remoción del colorante anilina burdeos, mediante la fotocatalisis heterogénea, llevando el proceso a varias condiciones de cambio, como por ejemplo, el pH y concentraciones del colorante anilina, con el fin de evaluar la influencia que tienen estos dos sobre la remoción total de contaminante. Al final comprobaron la importancia de las condiciones de (pH y concentraciones del colorante) demostrando que a pH 3 (ácidos) tiene una mayor degradación del compuesto, logrando remover el 89% a 120 min, mientras que a pH neutros solo se logró 66% de remoción en el mismo tiempo. Con referencia a las concentraciones del colorante anilina, se demostró que la concentración 75 ppm presento mejor rendimiento al cabo de 120 min y a concentraciones 50ppm. Si bien es cierto que la presencia del catalizador TiO_2 logra un mejor rendimiento debido al incremento de la disociación de la molécula H_2O , generando más números de radicales libres, fomentando la degradación (Gabriel & Perez, 2019).

(Gómez-gonzález et al., 2021). Estudiaron la fotocatalisis heterogénea para la degradación de los compuestos utilizados en pesticidas químicos como lo es orto-nitroanilina y

la meta-nitroanilina, derivados de colorantes de tipo azoico, productos farmacéuticos y aditivos de combustibles, entre otros productos. Para este estudio, se construyó un reactor y se evaluó la cantidad de TiO_2 , el valor del pH y la concentración de oxidante H_2O_2 para ambas nitroanilina.

Se evaluó la degradación de la 2-nitroanilina, con diferentes concentraciones del catalizador (TiO_2) 0,3 g/L -0,5 g/L- 0,7 g/L y 0,9 g/L, con las últimas dos concentraciones se observó un aumento de la degradación, que pasó de 32 a 37 % sin adición de oxidante con un de pH de 5,7, y en la degradación de la 3-nitroanilina, y se utilizó la dosificación de 0,7 g/L de TiO_2 con la que se habían conseguido los mejores resultados para la remoción de 2-nitroanilina. El valor de pH se fijó entre 2 y 4, y la concentración de peróxido fue de 500 y 700 ppm. Se pudo comparar que para la degradación de la 2-nitroanilina se requirieron altas concentraciones del oxidante y pH ácidos, contrario a la degradación del isómero 3-nitroanilina (Gómez-gonzález et al., 2021).

(ANDRÉS FELIPE PRADA ROJAS, 2021) Evaluó la efectividad del uso del fotocatalizador TiO_2 para la remoción de gases contaminantes tipo NO_x en el aire; siendo un estudio óptimo ya que los NO_x son contaminantes atmosféricos que pueden provocar numerosas reacciones químicas, produciendo múltiples enfermedades en la salud humana como, enfermedades respiratorias crónicas, dañar las membranas de las células en el tejido pulmonar y reducir el paso del aire, entre otras, estas afectaciones hacen que su eliminación sea una prioridad. Durante el estudio, se comparó las diferentes metodologías, aplicaciones y costos, además analizaron 4 variables como: características físico-químicas del catalizador, alta porosidad, buena área superficial y alto grado de dispersión del TiO_2 lo cual, generan mayores porcentajes de remoción de los NO_x . Al terminar el estudio, se pudo evidenciar que la fuente e intensidad de radiación son variables y estas pueden afectar en gran medida el proceso para la

remoción NO_x en el aire. Lo anterior se confirma con varios estudios donde emplean la fotocatalisis con TiO_2 mostrando un proceso efectivo y aplicable en la actualidad como una tecnología ambientalmente amigables (ANDRÉS FELIPE PRADA ROJAS, 2021).

(SAMANTA, 2020). Analizó el comportamiento de la concentración de cianuro que se encuentra presenta en aguas residuales industriales, sobre todo en las actividades mineras. En este estudio se evaluó la oxidación fotocatalítica para la remoción del ion cianuro en aguas residuales minerometalúrgicas. Donde, se tuvieron en cuenta ciertos parámetros de estudio: Inyección de aire 100% O_2 , agente oxidante en este caso el peróxido de hidrógeno (H_2O_2), fuente de luz (UV) y el catalizador, Dióxido de Titanio (TiO_2). Se encontró que fue importante mantener la muestra a una temperatura de 4°C , en un lugar completamente cerrado y un pH 10

Se logró reducir hasta un 72.3% en un transcurso de 2 horas, la donde la concentración inicial fue de 292.5ppm y se redujo a 35.98ppm, mediante fotocatalisis comprobando así la eficiencia del catalizador y el ante oxidante que fue el agua oxigenada (SAMANTA, 2020)

Análisis del estado de arte

Con el desarrollo del barrido bibliográfico, se conoció, la importancia de implementar nuevas tecnologías que además de ser eficaces, sean sostenibles y amigables con el medio ambiente, como lo son los procesos de oxidación avanzada, que en la actualidad se implementan con más frecuencia, ya que este proceso es efectivo y puede remover compuestos orgánicos como los fenoles, inactivar bacterias como la *Escherichia coli* y metales pesados como: cromo, mercurio, cianuros, plomo y arsénico, que son la problemática más grande y frecuente en las aguas residuales domésticas e industriales, ya que ocasionan enfermedades como el paludismo (259 000 muertes anuales) las disenterías (846 000 muertes anuales) afectaciones pulmonares (567 000 muertes anuales) y cánceres (1,7 millones de muertes anuales).

Se identificó que el método de fotocatalisis heterogénea, es el más empleado sobre la fotocatalisis homogénea, esto se debe a que la fotocatalisis heterogénea tiene una reacción más fuerte sobre el contaminante, teniendo una separación más fácil de este mismo, adicionalmente puede tratar contaminantes de baja concentración y usualmente no genera lodos así que no requieren de un proceso adicional haciéndolo más económico, a diferencia de la fotocatalisis homogénea.

Los procesos de oxidación avanzada, manejan gran variedad de catalizadores (TiO_2 , ZnO , CdS , WO_3 , ZnS , SrTiO_3 , $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) pero en los últimos años, el catalizador con más relevancia en las investigaciones es el TiO_2 , su importancia radica en las ventajas que proporciona, ya que tiene buena resistencia química y a la fotocorrosión, alta fotoactividad y estabilidad térmica, baja temperatura de operación y toxicidad, así como bajo consumo de energía y bajo costo (abundancia de titanio) es excelente transmitancia óptica y tiene alto índice de refracción (ANDRÉS FELIPE PRADA ROJAS, 2021).

Finalmente con el barrido bibliográfico, se analizó la importancia de las diferentes variables en los procesos de oxidación avanzada, como un pH ácido ($3 \leq \text{pH} \leq 5$) temperatura ambiente entre 8 y 20°C, espectro de luz que va de 100nm a 400 nm y catalizadores que sean semiconductores como Fe_2O_3 - Cu_2O - ZnO - TiO_2 .

Gráficas

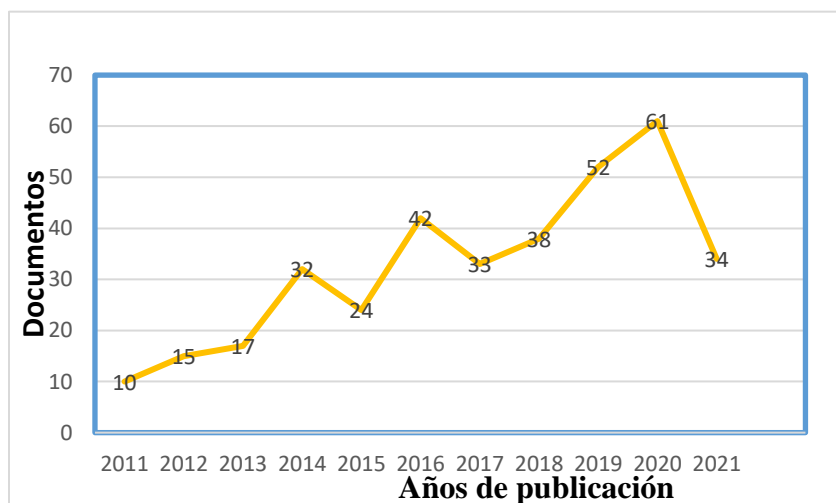
En el siguiente apartado se ha realizado una búsqueda en la base de datos Scopus con palabras claves de la investigación, ésta exploración abarca los últimos diez años, y como resultado arroja un total de 362 documentos relacionados.

En la (Ver **Gráfica 1**) se pueden observar los papers referentes a los procesos de oxidación avanzada y fotocatalisis, encontrados en la base de datos Scopus. Se evidencia que en los primeros tres años, (2011 hasta el año 2013) los artículos publicados, año tras año tenían un incremento de cinco a siete investigaciones, pero a partir del año 2014 el incremento de los artículos han subido a más de veinte investigaciones por año, esto puede ser, porque el tema sobre depuración de aguas residuales en los últimos años ha sido de gran interés y en la búsqueda de soluciones eficaces se encuentran los procesos de oxidación avanzada.

También se evidencia que en lo que llevamos de este año 2021, se han publicado 34 artículos y es evidente que al terminar el año se dupliquen las investigaciones del año anterior.

Gráfica 1.

Publicaciones SCOPUS por año.



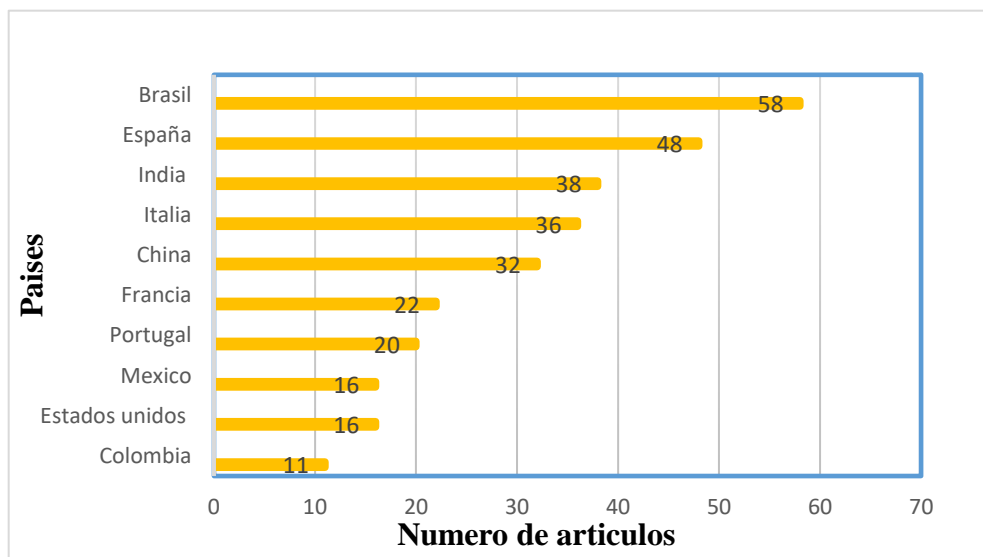
Basado en (Elsevier, 2004)

Con referencia a la siguiente grafica (ver *Gráfica 2*) Se ha filtrado los datos de la gráfica número uno por países que más han realizado publicaciones, sobre los procesos de oxidación avanzada en los últimos diez años (2011 al 2021).

Realizando este filtro por el buscador Scopus, se pudo evidenciar que actualmente son muchos los países que realizan investigaciones sobre los procesos de oxidación avanzada. Podemos ver que son varios los países de Europa (España, Italia, Portugal, Francia) que más publicaciones e investigaciones han realizado, siendo España el primer país con 48 publicaciones. Esto se debe a que en España, el tratamiento terciario de aguas residuales es más frecuente que en otros países, adicionalmente en los últimos años ha crecido la preocupación en Europa, por la alta contaminación de las aguas subterráneas y superficiales a causa de los hidrocarburos clorados, procedentes de vertederos, solares industriales contaminados y actividades industriales.(Nixon et al., 2000). En Latinoamérica, el país con mayores investigaciones ha sido Brasil. Actualmente Brasil, tiene casi la quinta parte de las reservas de agua en el mundo y un crecimiento de los nuevos complejos industriales, en particular en el noreste, que resulta en impactos ambientales a corto, mediano y largo plazo, tales como la contaminación y la competencia por los recursos naturales (especialmente agua). De acuerdo con el informe del Banco Mundial, los investigadores encontraron residuos industriales, incluyendo metales pesados, en los cursos de agua en varias áreas metropolitanas. Tales contaminantes se descargan sin ningún tratamiento previo, debido a esto actualmente Brasil, está en la búsqueda de nuevas alternativas para el manejo de las aguas residuales industriales. Seguido a Brasil en investigaciones se encuentra México, Estados Unidos y por ultimo Colombia.

Gráfica 2.

Artículos publicados en cada país.



Basado en (Elseiver, 2004)

Conclusiones

Con la siguiente investigación se pudo documentar, las diferentes técnicas, para el tratamiento de las aguas residuales industriales, asociadas a procesos de fotocatalisis. De igual forma se reconoció la afectación que tiene el mal manejo de las aguas residuales industriales, los cuales representan un riesgo para el medio ambiente, puesto que son sustancias con una gran estabilidad química ante los procesos de biodegradación ocasionando, desestabilización en el recurso suelo, aire y agua. Esto a su vez afectando la salud humana ya que no son fáciles de ser metabolizadas, generando acumulación de estos mismos en el organismo, lo cual trae consecuencias a corto, mediano y largo plazo como, anemia, disfunción renal, cálculos renales, osteoporosis, trastornos respiratorios, hipertensión, trastornos nerviosos, cefalea, vértigo, alteración del sueño, pérdida de peso, cáncer de próstata y pulmón, neumonitis, edema pulmonar y hasta la muerte.

Así mismo se identificó y analizó la importancia de las diferentes variables en los procesos de oxidación avanzada, como el Ph, temperatura, intensidad de la radiación, aditivos y diseño del reactor, que como pudimos evidenciar tiene una afectación de manera significativa en los procesos fotocatalíticos, dando como resultado que dependiendo de estas variables es la efectividad de la remoción de metales pesados de las aguas industriales. Como por ejemplo, a Ph ácidos ($3 \leq \text{pH} \leq 5$) es más eficiente la remoción de metales pesados. Así como la importancia de la intensidad de la radiación, ya que acelera la degradación de estos compuestos, también se identificó que el catalizador más utilizado en procesos de oxidación avanzada es el TiO_2 , esto se debe a las ventajas que proporciona, ya que es uno de los óxidos metálicos más estudiados, es considerado no tóxico, resistente a la corrosión, es

biocompatible y de bajo costo así como bajo consumo de energía, a diferencia de los demás catalizadores.

Finalmente, se observaron las diferencias que existen entre los procesos de fotocatalisis heterogénea y fotocatalisis homogénea, como su aplicación en el tratamiento de aguas residuales industriales. Actualmente la fotocatalisis más utilizada en procesos de remoción de metales pesados es la fotocatalisis heterogénea, ya que tiene una reacción más fuerte sobre el contaminante, teniendo una separación más fácil de este mismo, adicionalmente puede tratar contaminantes de baja concentración y no requiere recuperar el catalizador como la fotocatalisis homogénea.

Recomendaciones

Es necesario revisar la reglamentación actual, con el objetivo de mejorar la regulación de los residuos líquidos vertidos a las fuentes hídricas sin ningún control, en especial, aquellos vertidos por industrias, los cuales son los mayores generadores de metales pesados. Estudiar la posibilidad de crear impuestos y sanciones económicas por concepto de emisiones descontroladas de estas sustancias, buscando incentivar el uso de tecnologías “limpias” como lo es el proceso de fotocátalisis que resulta efectivo, económico y contribuye al desarrollo sostenible, el mismo que tanto se busca hoy a causa de los serios problemas ambientales.

Por último, actualmente existen una cantidad considerable de estudios relacionados con el tema de fotocátalisis para mineralización de aguas residuales, sin embargo, su aplicación es muy poco común. Es importante entablar proyectos con industrias, entidades del gobierno o entidades ambientales que permitan aplicar a gran escala este proceso, así como incentivos, planes, proyectos y estrategias.

Referencias

- Acosta, L. (2009). Madrid “ Proceso Fotofenton De Oxidación Química Para El Tratamiento De Aguas Industriales .” *Universidad Carlos III de Madrid*.
- Alberto Marinas Aramendia. (2007). Investigación Química Catálisis heterogénea y Química Verde. *An. Quim*, 103(1), 30–37.
- ANDRÉS FELIPE PRADA ROJAS. (2021). EVALUACIÓN DE LA EFECTIVIDAD DEL USO DEL FOTOCATALIZADOR TiO₂ PARA LA REMOCIÓN DE GASES CONTAMINANTES TIPO NO_x EN EL AIRE. *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952., 1, 90.
- Assadi, A., Dehghani, M. H., Rastkari, N., Nasser, S., & Mahvi, A. H. (2012). Photocatalytic reduction of hexavalent chromium in aqueous solutions with zinc oxide nanoparticles and hydrogen peroxide. *Environment Protection Engineering*, 38(4), 5–16.
<https://doi.org/10.5277/EPE120401>
- BETANCURT, E. C. (2014). DEGRADACIÓN POR FOTOCATÁLISIS HOMOGÉNEA EN REACTOR ARTESANAL Y HELIOFOTOCATALÍTICO DEL 1-HIDROXI-4-METILBENCENO. *Tetrahedron Letters*, 55, 90.
- Bose, S. K., & Chakraborty, U. C. (1957). CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS: IMPLICACIONES EN SALUD, AMBIENTE Y SEGURIDAD ALIMENTARIA. *The Indian Journal of Pediatrics*, 24(1), 14. <https://doi.org/10.1007/BF02796157>
- CARVAJAL, Y. A. T.-M. A. P. (2013). EVALUACIÓN DE LA DEGRADACIÓN DEL COLORANTE AMARILLO REACTIVO, ÚTIL EN LA INDUSTRIA TEXTIL POR FOTODEGRADACIÓN CON MÉTODOS COMPARATIVOS ENTRE CATÁLISIS HETEROGÉNEA (TiO₂) Y HOMOGÉNEA (FOTO-FENTÓN). *Journal of Chemical*

- Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.
- César, J., Mejía, M., & Salgado, R. A. (2015). *Fotocatálisis Heterogénea Solar: Aplicación De Películas Gruesas De Tio2 En La Eliminación De Contaminantes Emergentes En Agua*.
- Chacón, M. (2002). Tratamiento de aguas residuales provenientes de la Industria textil mediante fotocátalisis solar. *Instituto Mexicano de Tecnología Del Agua*, 1–7.
- Collazos, C. J. (2008). Tratamiento de aguas residuales domesticas e industriales. *Universidad Nacional De Colombia*, 49.
- Consortio Carinsa-incoplán Ltda. (1993). *obras de rehabilitación del río Magdalena sector Barrancabermeja-La Gloria estudio de impacto ambiental*.
http://www.neotropicos.org/Informes/EIA_NavegacionBarranca-LaGloria_1993.pdf
- Cortez, V. (2018). Eliminación de contaminantes emergentes de aguas residuales hospitalarias mediante procesos de oxidación avanzada. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 28.
- Egziabher, T. B. G., & Edwards, S. (2013). EVALUACIÓN DE LOS SISTEMAS FOTOCATALÍTICOS CON TiO₂ Y CeO₂/TiO₂ INMOVILIZADOS EN ACERO INOXIDABLE PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS PROVENIENTES DEL RÍO ARZOBISPO (BOGOTÁ). *Africa's Potential for the Ecological Intensification of Agriculture*, 53(9), 1689–1699.
- Elseiver. (2004). *Scopus*. <https://www.scopus.com/home.uri>
- Esmeralda, C., Galván, R., & Quezada, A. (2015). *SOL-GEL MODIFICADO CON ÁCIDO BÓRICO*. 4, 1517–1522.
- Espinosa, G. S., & Mera, G. A. (2015). *Alternativas ambientales para la remoción de cromo hexavalente en residuos líquidos de los laboratorios especializados de la Universidad de*

Nariño.

Fillat, M. T. (2018). *EVALUACION DE LA EFICIENCIA EN LA DEGRADACION DEL CIANURO POR FOTOCATALISIS HOMOGenea UV-C/H2O2 A NIVEL DE LABORATORIO.*

Fitria. (2013). EVALUACIÓN DE LOS SISTEMAS FOTOCATALÍTICOS CON TiO₂ Y CeO₂/TiO₂ INMOVILIZADOS EN ACERO INOXIDABLE PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS PROVENIENTES DEL RÍO ARZOBISPO (BOGOTÁ). *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.

FRANCISCO JAVIER ONANDIA OSORES. (2017). “*Propuesta De Mejora Del Sistema De Gestión De Seguridad Y Salud En El Trabajo En La Producción De Tilapia (Técnica Biofloc).*” 1–122.

<http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/2926/T10-O55-T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Franco, N. O. G. mejia; A. (2001). *Remoción de los iones mercurio y cromo* (p. 7).

Gabriel, M., & Perez, L. (2019). *Remoción del colorante anilina burdeos, mediante la fotocatalisis heterogenia.* 87.

Gómez-gonzález, S. M., Rodríguez-pérez, J. R., Castellanos-blanco, N. Y., & Cortes-hernández, H. F. (2021). *Fotocatálisis heterogénea para la degradación de la orto- nitroanilina y la meta-nitroanilina Heterogeneous photocatalysis for ortho- and meta- nitroaniline degradation Resumen Introducción.* 45(174), 300–312.

Hernandez, J. (2012). *Desarrollo de materiales nanoestructurados “dióxido de titanio con oro (AU/TIO2)”*, para a descomposición de moóxido de nitrógeno y metil terbutileter, en

sistemas fotocatalíticos. 9.

- Hincapié-Mejía, G. M., Ocampo, D., Restrepo, G. M., & Marín, J. M. (2011). Fotocatálisis heterogénea y foto-fenton aplicadas al tratamiento de aguas de lavado de la producción de biodiesel. *Informacion Tecnologica*, 22(2), 33–42. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642011000200005>
- IDEAM. (2011). Informe del estado del medio ambiente y de los recursos naturales renovables 2010. In *Report*.
- Muñoz, J. S. C. (2012). Fotocatálisis heterogénea para el abatimiento de tensoactivos aniónicos en aguas residuales. *Producción + Limpia*, 6(2), 92–107.
<http://repository.lasallista.edu.co:8080/ojs/index.php/pl/article/view/133/68>
- Nixon, S. C., Lack, T. J., & Hunt, D. T. E. (2000). *¿Es sostenible el uso del agua en Europa? 2*, 36. file:///C:/Users/Usuario/Downloads/water_assmnt07es.pdf
- Nutr, R. C. (2020). *Tratamiento de aguas residuales de la industria textil por medio de luz ultravioleta: una comparación de dióxido de titanio y fenton*. 47, 765–771.
- Papamija, M., & Sarria, V. (2010). Degradación fotocatalítica del ibuprofeno empleando dióxido de titanio. *Revista de Ingeniería*, 31, 47–53. <https://doi.org/10.16924/revinge.31.5>
- Pinedo Hernández, J., Marrugo Madrid, S., Enamorado Montes, G., Urango Cárdenas, I., & Marrugo Negrete, J. (2017). Optimization of pH and TiO₂ levels on the mercury removal in a photocatalytic recirculation system with UV-Lamp irradiation. *Ingeniería y Desarrollo*, 35(2), 305–319. <https://doi.org/10.14482/inde.35.2.10161>
- Restrepo, G. M., Rios, L. A., Marin, J. M., Montoya, J. F., & Velásquez, J. A. (2008). Evaluation of photocatalytic treatment of industrial wastewater using solar energy. *Dyna*, 75(155), 145–153.

- Rodríguez, A. (2016). *Tratamiento avanzado de aguas residuales industriales*. 63–67.
- Rojas, I. R. (2002). GETIÓN INTEGRAL DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES. *Conferencia Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales, 1*, 19.
- Rubiano, H., Marcela, C., Laguna, C., Alejandro, W., Zapata, S., Elena, C., Marin, S., H, C. M. R., C, W. A. L., S, C. E. Z., & S, J. M. M. (2005). *Estudio sobre las posibilidades de aplicación de la fotocatalisis heterogénea a los procesos de remoción de fenoles en medio acuoso. 1*, 19.
- SAMANTA, A. G. G. (2020). OXIDACIÓN FOTOCATALÍTICA PARA LA REMOCIÓN DEL IÓN CIANURO EN AGUAS RESIDUALES MINERO-METALÚRGICAS. (*Bachelor's Thesis, Machala: Universidad Técnica de Machala*), 1–117.
[http://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/16242/1/E-11896_PALADINES TENE ANDREA CAROLINA.pdf](http://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/16242/1/E-11896_PALADINES_TENE_ANDREA_CAROLINA.pdf)
- Tapia, J., Freer, J., Mansilla, H., Villaseñor, J., Bruhn, C., & Basualto, S. (2002). Estudio de reducción fotocatalizada de cromo hexavalente. *Boletín de La Sociedad Chilena de Química*, 47(4), 469–476. <https://doi.org/10.4067/s0366-16442002000400018>
- Vargas Licon, S. P., & Marrugo Negrete, J. L. (2019). Mercury, methylmercury and other heavy metals in fish in Colombia: Risk from Ingestion. *Acta Biologica Colombiana*, 24(2), 232–242. <https://doi.org/10.15446/abc.v24n2.74128>
- Villanueva, A. A. C., Flores, H. E., Sahagún, R., SILVA, Á. S., ZAMORA, H. D., Rojas, I. R., Rodrigues, V. A., RNE - OS - 090, Piérart, I. S. P., Rojas, G. C., Melorose, J., Perroy, R., Careas, S., Llagas Chafloque, W., Guadalupe Gómez, E., Lara Borrero, J. A., Garcia, J. S., Corzo, A. H., Delgadillo, O., ... Alvarado, P. C. O. (2013). Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales. *Universidad Politecnica de Cataluña*,

I(3), 39–51.

Zarazua-Aguilar, Y. S. P. P.-C. (2017). Influencia De La Irradiación Microondas/Ultrasonido En La Síntesis Sol-Gel De Nano Partículas De DíOxido De Titanio Para Su Aplicación En Fotocatálisis. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, *16(3)*, 899–909.