



Universidad César Vallejo

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

Métodos para la activación de los persulfatos peroximonosulfato y peroxidisulfato por materiales carbonosos para la eliminación de contaminantes orgánicos del suelo: Revisión sistemática

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**  
**INGENIERA AMBIENTAL**

**AUTORAS:**

Batállanos Mendoza, Nidia (ORCID: 0000-0002-8997-8966)

Solorio Quispe, Linda (ORCID: 0000-0002-4372-2527)

**ASESOR:**

MG. Honores Balcázar, Cesar Francisco (ORCID: 0000-0003-3202-1327)

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:**

Tratamiento y Gestión de los Residuos

**LIMA – PERÚ**

**2022**

**DEDICATORIA:**

En primer lugar, a Dios por darme sabiduría, salud, vida, la fuerza entereza para terminar mis estudios y darme la perseverancia para escribir mi Tesis

A mis padres, por el constante Apoyo que me brindan durante mi etapa universitaria a mi Hermana quien con sus palabras de aliento no me dejaba de apoyar para que siguiera adelante para cumplir mi ideales y a los profesores y compañeros que nos guiaron en este camino

**Linda**

**DEDICATORIA:**

En primer lugar, agradezco a dios por brindarme un juicio crítico y la fortaleza para tomar decisiones, a mi familia por brindarme su apoyo incondicional en los momentos más difíciles, así como en los momentos más tranquilos, a mis amigos por brindar sus palabras de aliento para poder conseguir esta meta y a los docentes que día a día me acompañaron durante mi etapa universitaria guiándome y enseñándome a no rendirme.

**NIDIA**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos a la Universidad César Vallejo, por la oportunidad brindada para poder obtener el grado de Ingeniero Ambiental, siendo egresadas de otra universidad que no obtuvo el licenciamiento. Al mismo tiempo agradecemos, nuestro asesor y docente que colaboro con nosotras para llevar a cabo nuestro presente trabajo de investigación, docente y colaborador que a través de sus enseñanzas, observaciones y palabras de aliento nos brindó la vía adecuada a la información requerida y su proceso filtramiento de dicha información para realizar y culminar el presente trabajo de manera satisfactoria.

## ÍNDICE DEL CONTENIDO

CARÁTULA.....	i
DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	iv
ÍNDICE DE TABLAS.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vi
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	vii
RESUMEN.....	viii
ABSTRACT.....	ix
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. MARCO TEÓRICO.....	4
III. METODOLOGÍA.....	16
3.1. Tipo y diseño de investigación.....	16
3.2. Categoría, subcategoría y matriz de categorización.....	16
3.3. Escenario de estudio.....	18
3.4. Participantes.....	18
3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	18
3.6. Procedimiento.....	18
3.7. Rigor científico.....	20
3.8. Método de análisis de información.....	20
3.9. Aspectos éticos.....	21
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	22
V. CONCLUSIONES.....	32
VI. RECOMENDACIONES.....	33
REFERENCIAS.....	34
ANEXOS.....	48

## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Clases de compuestos orgánicos</i>	7
<i>Tabla 2. Matriz de categorización apriorística</i>	17
<i>Tabla 3. Procedimientos de búsqueda y filtración de artículos científicos</i>	19
<i>Tabla 4. Materiales carbonosos</i>	22
<i>Tabla 5. Activación de los persulfatos usando materiales de carbono dopados con heteroátomos y sin dopar</i>	25
<i>Tabla 6. Activación de los persulfatos usando materiales de carbono soportados con metal</i>	28

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Procesos de transporte de contaminantes orgánicos persistentes</i> .....	6
<i>Figura 2. Diagrama de las fuentes de COs y rutas de entrada a los ecosistemas del suelo</i> ---	8
<i>Figura 3. Propiedades intrínsecas de estos catalizadores y sus comportamientos fundamentales en la activación de PMS</i> -----	10

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

*Gráfico 1. Métodos de análisis de información* \_\_\_\_\_ 21

## RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo determinar cuáles son los métodos usados para la activación de persulfatos por materiales carbonosos, para lo cual realizó la búsqueda y recolección de 95 estudios científicos, los cuales se seleccionaron mediante el uso del método de análisis documental y la ficha de recolección de datos, donde:

De acuerdo con los materiales carbonosos para la eliminación de contaminantes orgánicos del agua se tiene que los catalizadores de materiales de carbono libres de metales en la producción de radicales sulfatos han presentado óptimos resultados, demostrándose que estos materiales son alternativas prometedoras a los catalizadores basados en metales convencionales. Además, los materiales carbonosos para eliminar contaminantes orgánicos del agua son el biochar y el carbón activado; siendo esto demostrado por el 60% de los investigadores. Se puede concluir que las actividades catalíticas de los materiales carbonosos mejoran significativamente tras el dopaje con los heteroátomos, además, el dopaje de heteroátomos en los materiales carbonosos mejora significativamente la actividad catalítica del peroximonosulfato (PMS) y peroxidisulfato (PDS) para eliminar los contaminantes orgánicos. Por último, los compuestos metálicos novedosos y respetuosos con el medio ambiente soportados en carbono son deseables para la activación de PMS/PDS, sustancias de hierro son las más usadas como activadores de PMS/PDS y los porcentajes de degradación son mayores al 90%, ello debido a que la gran superficie y la alta estabilidad de los materiales de carbono los hacen ideales para actuar como soportes de metales de transición.

**Palabras clave:** Métodos para la activación de persulfatos, peroximonosulfato, peroximonosulfato, materiales carbonosos, contaminantes orgánicos del suelo

## ABSTRACT

The objective of this study was to determine which are the methods used for the activation of persulfates by carbonaceous materials, for which the search and collection of 95 scientific studies was carried out, which were selected by using the documentary analysis method and the data collection sheet, where:

According to carbonaceous materials for the removal of organic pollutants from water it is found that catalysts of metal-free carbon materials in the production of sulfate radicals have presented optimal results, demonstrating that these materials are promising alternatives to catalysts based on conventional metals. In addition, carbonaceous materials to remove organic pollutants from water are biochar and activated carbon; being this demonstrated by 60% of the researchers. It can be concluded that the catalytic activities of carbonaceous materials are significantly improved after doping with heteroatoms, furthermore, heteroatom doping in carbonaceous materials significantly improves the catalytic activity of peroxymonosulfate (PMS) and peroxydisulfate (PDS) to remove organic pollutants. Finally, novel and environmentally friendly carbon-supported metal compounds are desirable for PMS/PDS activation, iron substances are most commonly used as PMS/PDS activators and degradation rates are greater than 90%, because the large surface area and high stability of carbon materials make them ideal to act as transition metal supports.

**Keywords:** Methods for the activation of persulfates, peroximonosulfato, peroxidisulfato, carbonaceous materials, soil organic pollutants

# I. INTRODUCCIÓN

Los suelos han sido considerados como el "biomaterial más complejo del planeta" ya que actúan, por ejemplo, como hábitat de organismos vivos, fuente de nutrientes, sumidero y mediador de carbono y regulador hidrológico de la calidad y la cantidad del agua (Smith Pete et al., 2016, p.2). Debido a las exigencias de un rápido crecimiento económico, y al encontrarse en la interfaz entre la geosfera, la atmósfera y la hidrosfera, los suelos están sujetos a diversos grados de perturbaciones directas e indirectas inducidas por el hombre que constituyen un importante motor del cambio global (Wang XiaoPing et al., 2016, p.1).

Debido a ello, los suelos se enfrentan a factores de estrés químico provocados por el hombre, como la entrada de pesticidas orgánicos o que contienen metales, en combinación con factores de estrés no químicos como la compactación del suelo y perturbaciones naturales como la sequía (Schaeffer Andrs et al., 2016, p.1). Aunque múltiples factores de estrés suelen coexistir en los ecosistemas del suelo, la acumulación de múltiples contaminantes orgánicos en el suelo es una gran amenaza debido a sus efectos en los sistemas ecológicos y la salud de los seres humanos (Duan Xiaoguang et al., 2016, p.3).

Los contaminantes orgánicos (COs) son una clase de contaminantes que se transportan en todo el mundo. Estos compuestos orgánicos, en particular los organoclorados, son compuestos altamente persistentes que se acumulan en sustratos bióticos y abióticos (Durante C. et al., 2016, p.1).

Estos COs al ser compuestos semivolátiles, sufren el transporte global de contaminantes, pudiendo viajar largas distancias y acumularse en ecosistemas remotos, incluidas las regiones polares (Kumar S. y Prasannamedha G., 2021, p.12). Así mismo, las altas concentraciones de COP se han asociado a efectos neurotóxicos y cancerígenos, inmunosupresión y alteraciones endocrinas, afectando al éxito reproductivo y, en muchos casos, causando la muerte (Mandal S. et al., 2016, p.2).

Debido a la preocupación por estos efectos que desencadenan los COs los procesos de oxidación avanzada basados en persulfato (PS-AOP) como los peroximonosulfato (PMS) y peroxidisulfato (PDS) para la eliminación de contaminantes orgánicos del suelo y agua han ganado una gran atención (Sarma H. et al., 2016, p.1).

Además, se ha demostrado que los materiales carbonosos siempre emergentes, incluidos los materiales de carbono prístino y sus derivados, los materiales de carbono dopados con heteroátomos y los materiales de carbono con partículas metálicas, son eficaces en la activación de persulfatos (peroximonosulfato (PMS) y peroxidisulfato (PDS) (Tsang Daniel et al., 2019, p.319).

Estos productos carbonosos mediante su activación permiten generar radicales libres o especies activas no radicales para la degradación de los contaminantes (Xiao Sa et al., 2020 p.1)

Por tal motivo, el presente trabajo de investigación plantea como problema de estudio:

**¿Cuáles son los métodos usados para la activación de persulfatos por materiales carbonosos?**, así mismo se propusieron los siguientes problemas específicos del estudio:

**PE1:** ¿Cuáles son los materiales carbonosos para la eliminación de contaminantes orgánicos del agua?

**PE2:** ¿Cuál es la activación de los persulfatos usando materiales de carbono dopados con heteroátomos y sin dopar para la degradación de contaminantes orgánicos?

**PE3:** ¿Cuál es la activación de los persulfatos usando materiales de carbono soportados con metal para la degradación de contaminantes orgánicos?

Y como objetivo general se tiene: Determinar cuáles son los métodos usados para la activación de persulfatos por materiales carbonosos. Elaborando de acuerdo a ello los siguientes objetivos específicos:

**OE1:** Definir cuáles son los materiales carbonosos para la eliminación de contaminantes orgánicos del agua

**OE2:** Determinar cuál es la activación de los persulfatos usando materiales de carbono dopados con heteroátomos y sin dopar para la degradación de contaminantes orgánicos

**OE3:** Determinar cuál es la activación de los persulfatos usando materiales de carbono soportados con metal para la degradación de contaminantes orgánicos

La ocurrencia y el destino de los contaminantes orgánicos (OP) en los suelos han sido objeto de una intensa investigación durante muchos años, principalmente debido a la urgente necesidad de responder al desafío de una mejor gestión de la calidad de los suelos; por tal motivo se requiere hacer la investigación, para encontrar una manera factible, amigable con el medio ambiente y de bajo costo que permita eliminar los COs que se encuentran contaminando el suelo y adicionalmente brindar un valor a los materiales carbonosos. Siendo enfocado el estudio para los futuros investigadores, para despertar su interés y que se pueda descubrir con nuevos estudios prácticos su factibilidad.

## II. MARCO TEÓRICO

El suelo es el biomaterial más complicado del planeta; como con cualquier material, el hábitat físico es de suma importancia para determinar y regular la actividad biológica (Wang Xiao Ping et al., 2016, p.59).

Este recurso presta múltiples servicios ecosistémicos, lo que permite una producción sostenida de alimentos y fibras, así como la regulación del clima, la regulación de las inundaciones, la mejora de la calidad del aire y del agua, la reducción de la erosión del suelo y la provisión de una reserva de biodiversidad (Morales Marianela E. et al., 2021, p.2).

Pero, todos los suelos están sujetos a algún grado de perturbación humana, ya sea directamente a través del uso y la gestión de la tierra, o indirectamente a través de las respuestas al cambio global inducido por el hombre, como la contaminación y el cambio climático (Zhou wenzhao et al., 2021, p.1). Distinguir la influencia natural de la humana directa e indirecta no siempre es sencillo, pero algunas actividades humanas y sus consecuencias tienen impactos claros y, a pesar de la gran heterogeneidad de las propiedades y respuestas del suelo, existen conocimientos científicos sólidos (Fang Guodong et al., 2016, p.2).

Ante ello, los suelos están sujetos a diversos grados de perturbación humana directa o indirecta, lo que constituye un importante motor de cambio global (Wang Chen et al., 2016, p.1).

Separar lo natural de la influencia humana directa e indirecta no siempre es sencillo, pero algunas actividades humanas tienen impactos claros (Zheng Wang et al., 2019, p.2). Estos incluyen el cambio de uso de la tierra, la gestión de la tierra y la degradación de la tierra (erosión, compactación, sellado y salinización) (Sun Ping et al., p.4).

La intensidad del uso de la tierra también ejerce un gran impacto en los suelos, y los suelos también están sujetos a impactos indirectos derivados de la actividad humana, como la deposición ácida (azufre y nitrógeno), la contaminación por metales pesados y los contaminantes orgánicos (Hu Limin et al., 2018, p.2).

El impacto humano sobre los suelos surge en gran medida de la necesidad de satisfacer la demanda de alimentos, fibras y combustibles de una población creciente,

incluido el aumento del consumo de carne a medida que los países en desarrollo se hacen más ricos, la producción de biocombustibles y el aumento de las zonas urbanizadas incrementa (Zhu Shishu et al., 2018, p.1).

Esto ha llevado a la conversión de tierras naturales en tierras gestionadas (extensificación) y a la intensificación de la agricultura y otras prácticas de gestión en las tierras existentes, como el aumento de los aportes de nutrientes y agua y el incremento de la frecuencia de las cosechas para aumentar el rendimiento por hectárea (Guo Furong et al., 2018, p.5).

Ante esto, ya sea de forma intencionada o no, un sinnúmero de contaminantes orgánicos (COs) (por ejemplo, pesticidas, biocidas, productos farmacéuticos, retardantes de llama, tensioactivos, hidrocarburos aromáticos policíclicos [PAHs], bifenilos policlorados [PCBs], dibenzo-p dioxinas policloradas [PCDDs] y dibenzofuranos policlorados [PCDFs]) acaban en el suelo como consecuencia de las actividades humanas (Schaeffer Andres et al., 2016, p.1).

Por otra parte, los procesos naturales potenciados por el calentamiento global y los fenómenos climáticos extremos resultantes (por ejemplo, sequías, inundaciones y huracanes) también influyen (Du Xiaodong et al., 2019, p.2).

Así como la degradación del suelo, pueden tener un fuerte impacto en la emisión secundaria, el transporte atmosférico y la deposición seca y húmeda, el transporte a las masas de agua a través de los procesos de escorrentía, el almacenamiento, la degradación y la toxicidad de los CO (Qian Li et al., 2019, p.3).

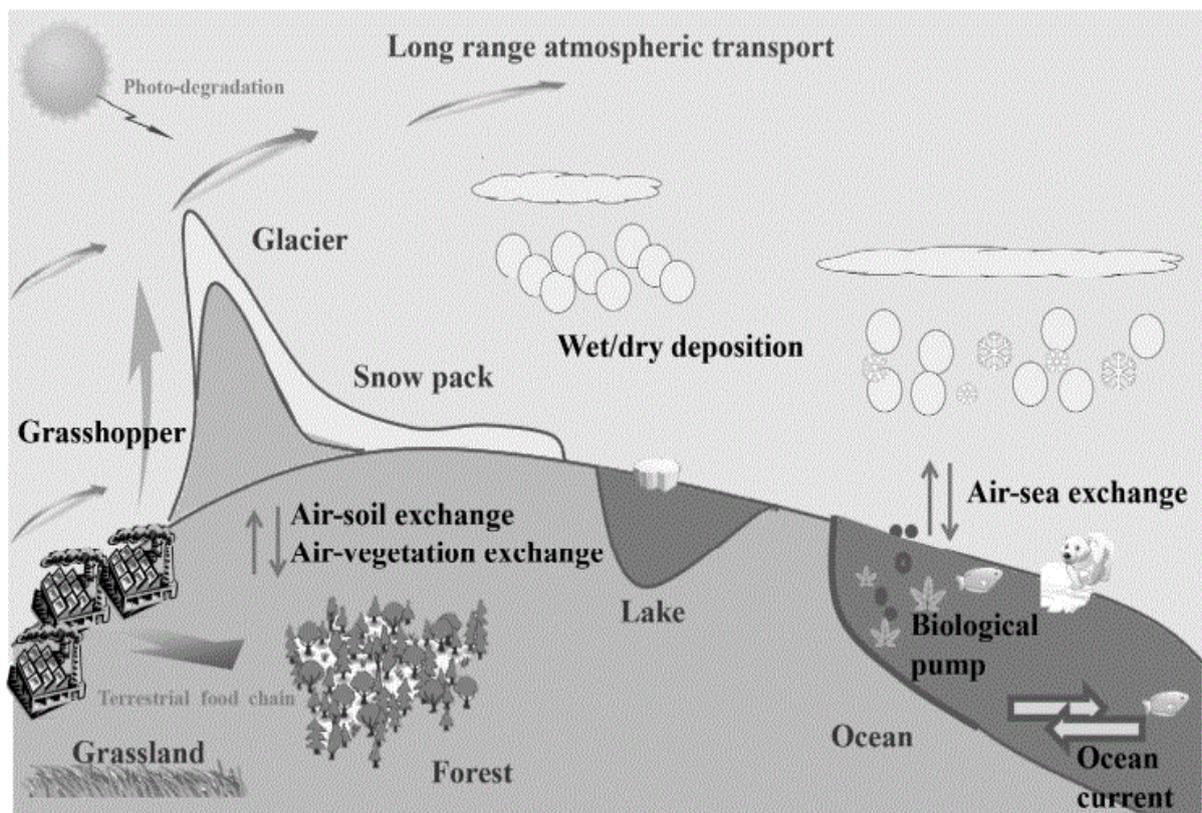
Las fuentes naturales por las cuales los COs pueden entrar en el ecosistema del suelo pueden ser a través de fuentes puntuales (por ejemplo, aplicación de lodos, estiércol y plaguicidas, y riego de aguas residuales) y/o fuentes difusas (por ejemplo, transporte atmosférico de largo alcance, y deposición húmeda y seca) (Dos Santos E. et al., 2017, p.2).

Así mismo, los procesos naturales, como la biodegradación, la fotólisis y la sorción, pueden atenuar la presencia y/o los impactos negativos de los CO en los ecosistemas del suelo (Ren Wei et al., 2021, p.2). Estos, COs y sus productos de transformación pueden persistir y acumularse en el suelo, lo que conlleva potenciales efectos

negativos en la biota del suelo o incluso en la salud humana (Li Degang et al., 2017, p.1)

Por lo tanto, son comprensibles las razones por las que el suelo se considera un depósito importante, aunque lábil, de COs y es así como se muestra en la figura 1 los diversos medios de transporte naturales y antropogénicos por los cuales ingresan los COs al ecosistema.

**Figura N°1.** Procesos de transporte de contaminantes orgánicos persistentes



*Fuente: Wang X. et al., (2016)*

Por tal motivo, la presencia de los contaminantes orgánicos (COs) se considera un factor predominante con respecto a otros factores de estrés (por ejemplo, factores de estrés no químicos, como la compactación del suelo, las perturbaciones naturales y la sequía) en los ecosistemas de suelos deteriorados (Liu Chao et al., 2019, p.1).

La lista de COs en los estudios de suelos es amplia y suele dividirse en varias clases, aunque cada OP es único en términos de propiedades fisicoquímicas y modo de acción toxicológico (Gauquie Jhanna et al., 2016, p.3).

Por ejemplo; los COs más comunes encontrados en los suelos se detallan en la tabla N°1.

**Tabla N°1. Clases de compuestos orgánicos**

<b>COMPUESTOS ORGÁNICOS</b>	<b>TIPOS</b>
<b>Hidrocarburos petrolíferos</b>	Alcanos, alquenos, cicloalcanos
<b>Compuestos clorados</b>	PCBs, PCDDs y PCDFs
<b>Hidrocarburos aromáticos monoméricos</b>	Benceno, tolueno, etilbenceno y xileno, conocidos colectivamente como BTEX
<b>PAHs</b>	Benzo [a] pireno, criseno y fluoranteno
<b>Plaguicidas y herbicidas</b>	Atrazina, el alacloro, el acetocloro y el bifenox
<b>Fungicidas</b>	Lindano, el metalaxil, la procimidona y el penconazol,
<b>Insecticidas</b>	Captán, el benomilo, el endosulfán, el heptacloro y el endrín

*Elaboración propia*

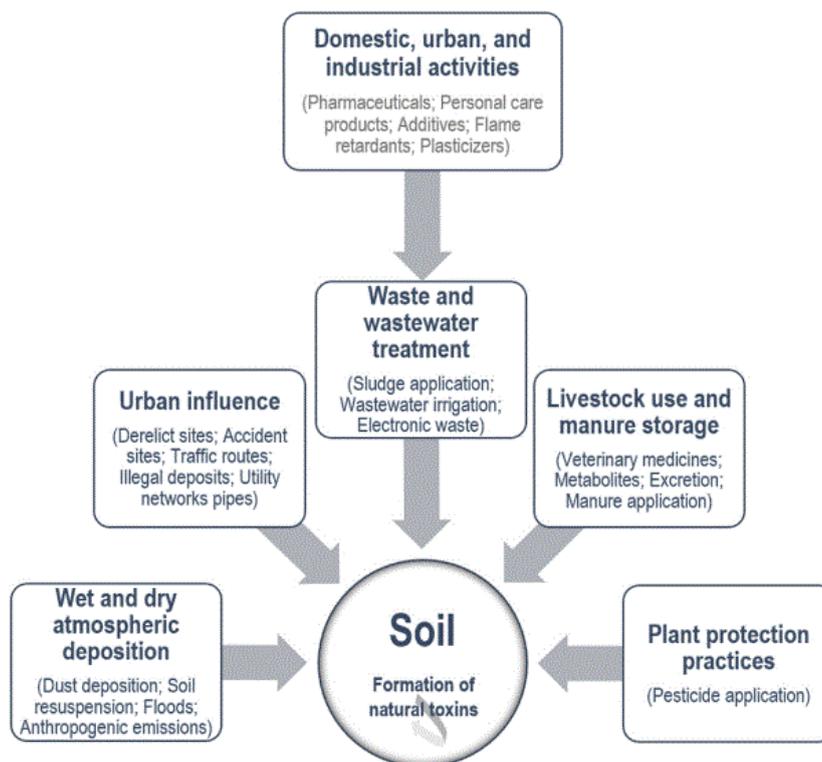
Estos COs pueden ser liberados directa o indirectamente en el suelo por diferentes vías; por ejemplo, los productos farmacéuticos y de cuidado personal pueden liberarse a través de la aplicación de lodos de depuradora en el suelo o mediante el riego (Vidal J. et al., 2020, p.1).

La presencia de microcontaminantes emergentes como productos farmacéuticos, disruptores endocrinos, productos de cuidado personal, nanomateriales y sustancias perfluoradas en el medio ambiente pueden ingresar a través de actividades antropogénicas y se han detectado en aguas superficiales, subterráneas e incluso en agua potable en concentraciones de nanogramos por litro a microgramos por litro (Tijani Jimoh O. et al., 2016, p.1).

Así mismo, algunos de estos COs son tóxicos, persistentes, bioacumulables y propensos al transporte a larga distancia, y como tales están incluidos en el Convenio de Estocolmo sobre COs persistentes (COPs), que determina la eliminación o

reducción de la liberación al medio ambiente de los COs listados (Manamsa Katya et al., 2016, p.2). Como se muestra en la figura 2.

**Figura N°2.** Diagrama de las fuentes de COs y rutas de entrada a los ecosistemas del suelo



Fuente: Duarte R. et al., (2018)

De manera análoga, se informa que pueden liberarse directamente al suelo (animales en los pastos) o indirectamente cuando el estiércol y productos procesados (por ejemplo, compost, lodos de depuradora) de las instalaciones ganaderas se aplican a los suelos como fertilizantes (Song Weiping et al., 2015, p.1).

Asimismo, los plaguicidas pueden introducirse en el suelo por prácticas agrícolas comunes y la escorrentía de jardines, céspedes y carreteras (Wu Doudou et al., 2019, p.2). Los COs también pueden llegar a los suelos superficiales mediante la deposición atmosférica de polvo del suelo resuspendido, polvo de la carretera y partículas de aire de origen antropogénico (por ejemplo, emisiones del tráfico, la industria, la calefacción doméstica y los procesos de incineración) en condiciones húmedas y/o secas y como materia particulada en suspensión (Huffer Thorsten et al., 2019, p.1).

También, las fugas subterráneas de las tuberías de aguas residuales pueden causar la dispersión de los CO y, en consecuencia, la contaminación del suelo, una vez

liberados o formados en el suelo, los COs pueden experimentar una variedad de complejos procesos físicos, químicos y biológicos que determinan su eliminación parcial o total (Fdez Sanromán A. et al., 2021, p.1).

La contaminación del suelo con contaminantes inorgánicos u orgánicos suele reducir la diversidad o la homogeneidad (distribución uniforme de las especies) de las bacterias del suelo (Huang Di et al., 2021, p.2). Por lo general, la combinación de múltiples factores de estrés, como los diferentes contaminantes o la contaminación y la sequía, ejerce una presión especialmente alta sobre las comunidades del suelo, y el efecto negativo combinado puede no ser aditivo sino sinérgico (Da Silva et al., 2021, p.3).

Los compuestos contaminantes orgánicos con altos valores que se introducen en el suelo tienden a permanecer adsorbidos en los sólidos de los lodos, como la materia orgánica o las partículas inorgánicas finas (He Ying et al., 2019, p.1). Si los compuestos se liberan debido a la degradación de la materia orgánica derivada de los lodos, las moléculas contaminantes pueden adsorberse o absorberse en materia orgánica del suelo más recalcitrante (Maeng Sung et al., 2021, p.2).

Dicha sorción puede ser reversible o irreversible, pero, en cualquier caso, la movilidad de los contaminantes orgánicos de baja concentración con poca solubilidad acuosa en el suelo es muy restringida (Zhao Shuning et al., 2016, p.2). Además, existen contaminantes orgánicos en el suelo suficientemente biodisponibles como para ejercer efectos tóxicos (Zhou Ming et al., 2016, p.1).

Estos pueden causar una amplia variedad de efectos adversos para la salud, incluidos el cáncer, la supresión del sistema inmunitario, la disminución de la función cognitiva y neuroconductual (Jiménez J. et al., 2016, p.2). La interrupción de la función tiroidea y de los esteroides sexuales, y al menos algunos de ellos aumentan el riesgo de enfermedades crónicas, como la hipertensión, enfermedades cardiovasculares y diabetes (CarAlharbi O. et al., 2018, p.2).

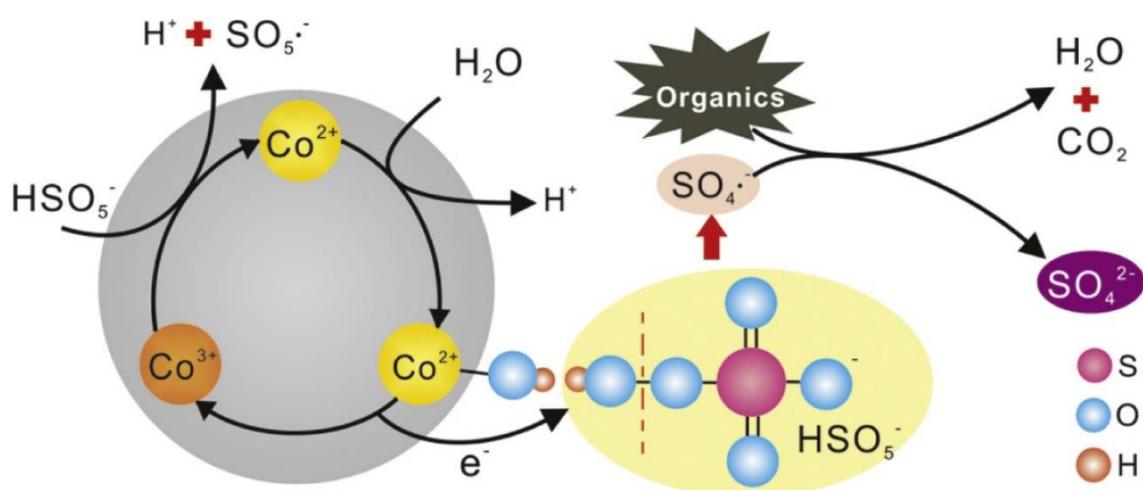
Estos no solo son responsables de problemas ambientales, sino también de varias enfermedades letales (Okeeffe J., 2020, p.1). Las diferentes enfermedades debidas a los COs son la diabetes, la obesidad, las alteraciones endocrinas, el cáncer, los problemas cardiovasculares, reproductivos y ambientales, además, se consideran

asesinos silenciosos debido a su naturaleza bioacumulativa y de larga persistencia (Guo Y. et al., 2016, p.1).

Ante ello, se ha comprobado que los materiales carbonosos siempre emergentes, incluidos los materiales de carbono prístinos y sus derivados, los materiales de carbono dopados con heteroátomos y los materiales de carbono con partículas metálicas, son eficaces en la activación de persulfatos (peroximonosulfato (PMS) y peroxidisulfato (PDS)) para generar radicales libres o especies activas no radicales para la degradación de los COs (Oh Wen D. et al., 2016, p.1).

Recientemente, los procesos de oxidación avanzada basados en radicales sulfato (SR-AOP) atraen cada vez más atención debido a su capacidad y adaptabilidad en la descontaminación. (Ver figura 3).

**Figura N°3.** Propiedades intrínsecas de estos catalizadores y sus comportamientos fundamentales en la activación de PMS



Fuente: Hu Peidong et al., (2016)

Los procesos de oxidación avanzada basados en radicales sulfatos (SR-AOP) que emplean catalizadores heterogéneos para generar radicales sulfato ( $\text{SO}_4^{\cdot-}$ ) a partir de peroximonosulfato (PMS) y persulfato (PS) se han empleado ampliamente para la eliminación de contaminantes orgánicos en el agua (Yuan R. et al., 2018, p.1).

En la remediación ambiental, la oxidación avanzada basada en reacciones radicales ha demostrado ser un método eficaz para la degradación de compuestos orgánicos refractarios (Hu Peidong et al., 2016, p.1). Donde, los procesos convencionales de oxidación avanzada (AOPs) dependen principalmente de los radicales hidroxilo (-OH) y recientemente, los AOPs basados en radicales sulfato ( $\text{SO}_4^{\cdot-}$ ) han sido utilizados para la degradación de contaminantes orgánicos debido a las ventajas del  $\text{SO}_4^{\cdot-}$  sobre el -OH (Kermani M. et al., 2018, p.2).

El  $\text{SO}_4^{\cdot-}$  tiene un tiempo medio más largo ( $3-4 \times 10^{-5}$ s) que el -OH ( $2 \times 10^{-8}$ s) y tiene selectividad hacia los compuestos ricos en electrones. pueden tener efecto en un amplio rango de pH (2,0-8,0). Además, el  $\text{SO}_4^{\cdot-}$  tiene un potencial redox (2,5 V-3,1 V) que es igual o incluso superior al del -OH (1,8-2,7 V) (Bekris L. et al., 2017, p.2).

La oxidación basada en ( $\text{SO}_4^{\cdot-}$  radical-) también puede formar oxidantes secundarios, por ejemplo, radicales carbonato, radicales hidroxilo, radicales superóxido u oxígeno que pueden influir tanto en la eficiencia de transformación como en la formación del producto (Waclawek S. et al., 2017, p.1).

Pero, en estado normal, el PMS y el PDS apenas pueden reaccionar con los contaminantes orgánicos, y se requiere una activación para producir radicales u otras especies reactivas para su funcionamiento (Lu Xian et al., 2018, p.2).

Los métodos generales para la activación incluyen el uso de energía externa (como el calor, la radiación de luz ultravioleta (UV), los ultrasonidos (US), la radiación gamma y las microondas), los activadores químicos (como los alcalinos, las quinonas y el fenol) y los metales de transición ( $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^0$ ) o los óxidos metálicos (Wei Zongsu et al., 2017, p.4).

El presente trabajo de investigación cuenta con 30 antecedentes de los cuales se detallan a continuación los 10 más resaltantes:

De acuerdo con Huang Beo Chen et al., (2018) en su trabajo, se demostró que el biocarbón, que se sintetizó a través de una sencilla pirólisis de lodos de depuradora en un solo recipiente, es un activador de persulfato eficaz para la degradación de contaminantes. Obteniendo como resultado una alta eficiencia de mineralización de ~80 % (eliminación total de carbono orgánico) en 30 min., así mismo, para el bisfenol

A se podría lograr una tasa de eliminación promedio de 3,21 mol de BPA por mol de oxidante por hora mediante peroximonosulfato en un amplio rango de pH de 4,0 a 10,0 con una dosis de biocarbón de 0,2 g L<sup>-1</sup>. Pudiendo concluir que no solo se proporciona un nuevo enfoque de reutilización de valor agregado para los lodos de depuradora como un activador de persulfato eficiente, sino que también sería beneficioso para seguir diseñando y fabricando catalizadores de persulfato a base de carbono.

Ouyang Da et al., (2019), en su estudio un material carbonoso de bajo costo, biocarbón de aguja de pino, se preparó bajo el proceso de pirólisis con oxígeno limitado y se aplicó para activar PMS para la degradación catalítica de 1,4-dioxano potencialmente cancerígeno. Obteniendo como resultado que dentro del sistema biochar/PMS, las eficiencias de degradación del 1,4-dioxano aumentaron del 4,1 al 84,2 % cuando las temperaturas de pirólisis del biochar aumentaron de 300 °C a 800 °C. Pudiendo concluir que, el 71,4 % y el 57,5 % de las tasas de eliminación de 1,4-dioxano se lograron en agua del grifo y aguas subterráneas contaminadas con 1,4-dioxano, lo que indica que la activación del PMS con biocarbón es una técnica prometedora para la remediación del agua contaminada con 1,4-dioxano.

Yu Jiangfeng et al., (2020), en su artículo preparó biocarbón poroso jerárquico de cáscara de camarón (PSS-bio) y se aplicó para la activación de persulfato para la eliminación de 2,4-diclorofenol. Donde, mediante los resultados descubrió que la temperatura de pirólisis desempeña un papel importante en la modulación de la estructura y las propiedades del carbono, donde el PSS-bio obtenido a 800 °C (PSS-800) exhibió la capacidad de adsorción más rápida y la mejor actividad catalítica con tasas de degradación 29 veces mayores que la de PSS-bio obtenido a 400 °C (PSS-400).

Wang S. y Wang J., (2019), en su estudio se preparó, caracterizó y aplicó un biocarbón derivado de lodos (SBC) para activar peroximonosulfato (PMS) para la degradación de triclosán (TCS) en agua y aguas residuales. Donde, las condiciones óptimas para la degradación de TCS se examinaron de la siguiente manera: pH 7,2, dosis de biocarbón de 1,0 g/L y concentración de PMS de 0,8 mM a 25 °C. Presentando como resultado que la eficiencia de eliminación del carbono orgánico total (TOC) alcanzó el 32,5 % en 240 min en condiciones óptimas y los radicales hidroxilo, los radicales sulfato y el oxígeno singulete contribuyeron a la

degradación de TCS. Pudiendo concluir que se demostró que SBC podría ser un activador efectivo de PMS para la degradación de contaminantes orgánicos tóxicos en agua y aguas residuales.

Yin Renli et al., (2019), en su trabajo científico, se preparó biocarbón derivado de lodos (SDBC) y se aplicó en la activación de peroxidisulfato (PDS) para la degradación del sulfametoxazol (SMX). Donde, los resultados muestran que en comparación con la ligera adsorción (16,5 %) de SDBC solo y la baja oxidación directa (10,1 %) de PDS solo, la tasa de degradación de SMX aumentó drásticamente a 94,6 % en el sistema SDBC/PDS combinado, lo que sugiere que SDBC puede activar con éxito y eficiencia PDS. Pudiendo concluir el análisis de costo de energía del sistema SDBC/PDS demostró aún más la aplicación posible y económica de la técnica SDBC/PDS para la degradación SMX.

Chen Xin et al., (2017), investigó la reacción entre el persulfato (PS) y los nanotubos de carbono (CNT) para la degradación del 2,4-diclorofenol (2,4-DCP). Donde los resultados sugirieron que no se producía ni radical hidroxilo (punto radicalOH) ni radical sulfatopunto radical ( $\text{SO}_4^-$ ). Por primera vez, la generación de oxígeno singlete ( $^1\text{O}_2$ ) se probó mediante varios métodos, incluida la espectrometría de resonancia paramagnética electrónica (EPR) y la cromatografía líquida. mediciones de espectrometría de masas. Además, la generación del radical superóxido como precursor del oxígeno singlete también fue confirmada mediante el uso de ciertos captadores y medida de EPR, en los que no se requería la presencia de oxígeno molecular como precursor del  $^1\text{O}_2$ . Demostró que los nanotubos de carbono podrían activar eficientemente PS para la degradación de 2,4-DCP. En consecuencia, se propuso un mecanismo catalítico que implica la formación de un intermedio de dioxirano entre PS y CNT, y la posterior descomposición de este intermedio en  $^1\text{O}_2$ .

Guan Chaoting et al., (2018), en su artículo investigó comparativamente la transformación de productos de bromofenoles (BrPs) por peroximonosulfato (PMS) activado por nanotubos de carbono (CNT). Donde, se encontró que tanto las especies radicales (es decir, el radical sulfato ( $\text{SO}_4^-$  radical) y el radical hidroxilo (punto radicalOH)) como las no radicales (es decir, el oxígeno singlete ( $^1\text{O}_2$ ) y complejos reactivos PMS-CNT) contribuyeron a la degradación de BrP por el sistema PMS/CNT. Pudiendo concluir que, los sistemas PMS/CNT y PDS/CNT son estrategias

prometedoras para eliminar de manera efectiva los BrP con el alivio de los subproductos tóxicos en los efluentes de aguas tratadas, mientras que el primero, que incluye especies radicales y no radicales, es más ventajoso en el tratamiento de diversos contaminantes (p. ej., electrones). fracciones ricas que contienen compuestos orgánicos y refractarios).

Yao Chenhui et al., (2019), en su investigación presentó como objetivos examinar la degradación de p-cloroanilina (PCA) por persulfato (PS) activado con carbón activado (AC); también investigar los efectos del pH inicial y la dosificación de AC. Los resultados mostraron que AC exhibe una buena actividad catalítica hacia PS. El aumento de la dosis de AC mejoró significativamente la tasa de degradación de PCA, pero la eliminación de PCA no estuvo obviamente influenciada por el pH inicial que oscilaba entre 3 y 9. Los resultados también demostraron que el TOC podía eliminarse en la oxidación de PS y que la dechloración del PCA era rápida (en los 30 minutos iniciales).

Forouzesh Mojtaba et al., (2019), en su trabajo estudió la activación de persulfato (PS) y peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ) en presencia de carbón activado granular (GAC) para investigar la degradación del antibiótico metronidazol (MTZ) en solución acuosa. Los resultados mostraron que GAC podría activar PS efectivamente mejor que  $H_2O_2$ . Además, tanto el proceso de adsorción como el de oxidación indujeron la eliminación de MTZ en el sistema GAC/PS con un notable efecto sinérgico en el sistema combinado. Después de 240 min, el 50 % de PS se degradó y el 80 % de MTZ y el 65 % de DQO se eliminaron en condiciones ambientales que contenían una concentración inicial de MTZ de  $100 \text{ mg L}^{-1}$ , relación molar PS/MTZ de 100/1, dosificación de GAC de  $5 \text{ g L}^{-1}$  y pH inicial de 3,9. Tanto la degradación de PS como la eliminación de MTZ siguieron una cinética de pseudo primer orden con una constante de velocidad de  $0,0006 \text{ min}^{-1}$  y  $0,0023 \text{ min}^{-1}$ , respectivamente. Pudiendo concluir que el GAC es un catalizador libre de metales favorable y prometedor para la utilización del tratamiento de aguas residuales.

Wei Mingyu et al., (2016), preparó nitruro de carbono gráfico soportado sobre carbón activado ( $gC_3N_4/AC$ ) a través de un enfoque térmico in situ y se utilizó como catalizador libre de metales para la degradación de contaminantes en presencia de peroximonosulfato (PMS) sin irradiación de luz. Donde, el rendimiento del catalizador estuvo significativamente influenciado por la cantidad de  $gC_3N_4$  cargada en AC;

pero casi no fue afectado por el pH de la solución inicial y la temperatura de reacción. Además, los catalizadores presentaron buena estabilidad. Concluyendo que los grupos C doble enlace O juegan un papel clave en el proceso; mientras que la exposición de más N-(C) 3grupo puede aumentar aún más su densidad de electrones y basicidad.

### **III. METODOLOGÍA**

#### **3.1. Tipo y diseño de investigación**

Las investigaciones desarrolladas por el hombre nos permiten entender el porqué de las cosas, al mundo o los fenómenos surgidos. Permittiéndonos obtener información que ayuden a entender, analizar o aplicar el conocimiento.

El tipo de investigación que se usó en el presente trabajo es aplicada, este tipo de investigación tiene como fin resolver problemas específicos surgidos en nuestra sociedad y que permite aplicar los conocimientos en la realidad para resolver las necesidades o problemas. Gutiérrez nos dice que en la investigación aplicada el conocimiento ya logrado se usa como base para generar nuevos conocimientos o respaldar los ya existentes (Gutiérrez 2016, p.1). Por este motivo en el presente estudio lo que se busca es estudiar métodos para activación de los Persulfatos, Peroximonosulfato y Peroxidisulfato por materiales Carbonosos para la eliminación de contaminantes orgánicos del suelo.

El diseño aplicado fue narrativo, este diseño nos permite plasmar los acontecimientos o sucesos contados por los sujetos de manera tal cual fue vivida en tiempo y contexto, donde el investigador debe evitar tergiversar lo narrado (Salgado A. et al., 2007, p.3). Esto se logra a través del investigador donde este debe tener un profundo entendimiento de los sucesos narrados. Es por tal motivo que la investigación empleara un diseño narrativo, ya que, se va tomar en cuenta y estudiar los métodos de activación para la eliminación de contaminantes orgánicos del suelo.

Presenta un diseño narrativo de tópicos, ya que, este estudio fue enfocado en un tema en específico, del cual fue recolectado la información de diferentes investigadores (Mertens et al., 2015, p.303). Esto debido que se va tomar los métodos experimentales generados por diferentes autores sobre la activación de los Persulfatos, Peroximonosulfato y Peroxidisulfato por materiales Carbonosos para la eliminación de contaminantes orgánicos del suelo

#### **3.2 Categoría, Subcategoría y matriz de categorización apriorística**

Para el presente estudio de investigación se clasifíco en categorías y sub categorías, que detallan información importante de acuerdo a los problemas y objetivos específicos.

**Tabla N° 2. Matriz de categorización apriorística**

<b>PROBLEMAS ESPECÍFICOS</b>	<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b>	<b>CATEGORÍAS</b>	<b>SUB CATEGORÍAS</b>	<b>UNIDAD DE ANÁLISIS</b>
<b>¿Cuáles son los materiales carbonosos para la eliminación de contaminantes orgánicos del agua?</b>	Analizar los materiales carbonosos para la eliminación de contaminantes orgánicos del agua	Los materiales carbonosos (Tsang Daniel et al., 2019, p.319)	Nanotubos de carbono Biochar Nanodiamantes prístinos	(Lu Xian et al., 2018, p.2), (Bekris L. et al., 2017, p.2), (Yin Renli et al., 2019, p.1), (Tsang Daniel et al., 2019, p.319).
<b>¿Cuáles es la activación de los persulfatos usando materiales de carbono dopados con heteroátomos y sin dopar para la degradación de contaminantes orgánicos?</b>	Definir la activación de los persulfatos usando materiales de carbono dopados con heteroátomos y sin dopar para la degradación de contaminantes orgánicos	La activación de los persulfatos usando carbono dopados (Tsang Daniel et al., 2019, p.319)	Carbonos dopados con N Carbonos dopados con S Carbonos dopados con B Carbonos dopados con P	(Hu Peidong et al., 2016, p.1), (Vidal J. et al., 2020, p.1), (Xiao Sa et al., 2020 p.1), (Ouyang Da et al., 2019, p.3),
<b>¿Cuál es la activación de los persulfatos usando materiales de carbono soportados con metal para la degradación de contaminantes orgánicos?</b>	Clasificar la activación de los persulfatos usando materiales de carbono soportados con metal para la degradación de contaminantes orgánicos	La activación de los persulfatos usando carbono soportados con metal (Hu Limin et al., 2018, p.2)	Metal-Carbón Metal-Nitrógeno-Carbono	(Wei Zongsu et al., 2017, p.4), (Yuan R. et al., 2018, p.1), (Huffer Thorsten et al., 2019, p.1), (Sarma H. et al., 2016, p.1),

Fuente: Elaboración propia

### **3.3 Escenario de estudio**

Al ser esta investigación una revisión sistemática, el escenario pasó a ser todos los espacios usados dentro de las investigaciones que se tomaron para hacer uso de su información en el presente trabajo.

Las bibliotecas que fueron usadas, campos de investigación o laboratorios son espacios que integraran el escenario de estudio del presente trabajo.

### **3.4 Participantes**

Las plataformas virtuales que sirvieron para la búsqueda de información y extracción de artículos científicos usados en el desarrollo del presente estudio contemplan a los participantes de esta investigación, los portales: Sciencedirect, Redalyc y Pubmed, se consideraron como participantes.

### **3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

Se usaron diferentes fuentes de información para el desarrollo de la investigación por ello con cada información tomada se utilizó la técnica de análisis documental, esta técnica nos permitió sintetizar las ideas más resaltantes de lo leído y crear un nuevo documento que servirá como guía para que el lector tenga más facilidad de encontrar y recuperar el documento original.

Ficha de análisis de contenido: este instrumento fue utilizado en el presente trabajo de investigación, a través de ella se pudo realizar el análisis documental permitiéndonos recolectar los datos de forma analítica.

### 3.6 Procedimientos

*Tabla N° 3. Procedimientos de búsqueda y filtración de artículos científicos*

ARTÍCULOS DE REVISIÓN LITERARIA					
TIPO DE DOCUMENTO	PALABRAS CLAVE	FUENTE	INCLUSIÓN	EXCLUSIÓN	TOTAL
<b>Artículos científicos</b>	Methods for the activation of persulfates, peroximonosulfato, peroxidisulfato, carbonaceous materials, soil organic pollutants	Sciencedirect (31)	- Investigaciones potencialmente relevantes al tema	- Por duplicidad	Total de artículos incluidos en la presente investigación después de la inclusión y exclusión.
		Redalyc (17)	- Por ser leídos de manera completa	- Por no contar con el año de antigüedad requerido	
		Pubmed (27)		- No presentar los materiales carbonosos	
<b>Cantidad</b>		75	17	53	39

Fuente: Elaboración propia

### **3.7 Rigor científico**

El rigor científico busca la integridad de los datos plasmados y que las conclusiones reflejen lo recopilado, por ello se busca transparencia y veracidad de la información. Existen tres criterios que permiten evaluar la autenticidad de una investigación, la credibilidad, confirmabilidad y transferibilidad (Arias M., Giraldo C., 2011, p. 504).

El criterio credibilidad permite que los datos obtenidos puedan ser reconocidos por los sujetos que participaron, donde habrá congruencia entre los resultados obtenidos en el trabajo de investigación y los sucesos recopilados por el investigador. Se infieren conclusiones que son reconocidos por los participantes (Salgado Lévano, 2007, p. 6). En el presente trabajo se extrajo información de fuentes con credibilidad y veracidad de esta forma se aplica este criterio.

El criterio confirmabilidad tiene como fin garantizar la neutralidad con la que se proyecta los datos recopilados donde los resultados reflejen la transparencia en la que se emitieron las descripciones por los sujetos participantes. Además, con este criterio se puede conocer las limitaciones o alcances que encuentra el investigador para controlar posibles juicios y mantener la neutralidad sobre los sucesos o participantes (Salgado Lévano, 2007, p.5). Se aplicó este criterio evitando emitir juicios parciales sobre los datos recopilados de los artículos científicos usados.

El criterio transferibilidad permite que los resultados de una investigación puedan ser transferidos a otros contextos, es decir si bien los fenómenos surgen en un determinado tiempo y espacio y estos no son transferibles, a través de descripciones detalladas y el conocimiento que tenga de ellas el investigador se puede lograr la transferibilidad (Castillo y Vásquez, 2009, p.4). Logrando así descubrir lo común y comparar con otros estudios el contexto, tiempo y participantes vinculados al fenómeno. Se analizó de manera exhaustiva cada dato recopilado y plasmado en el presente trabajo de investigación de esta manera se aplica el criterio transferibilidad.

### **3.8 Método de análisis de información**

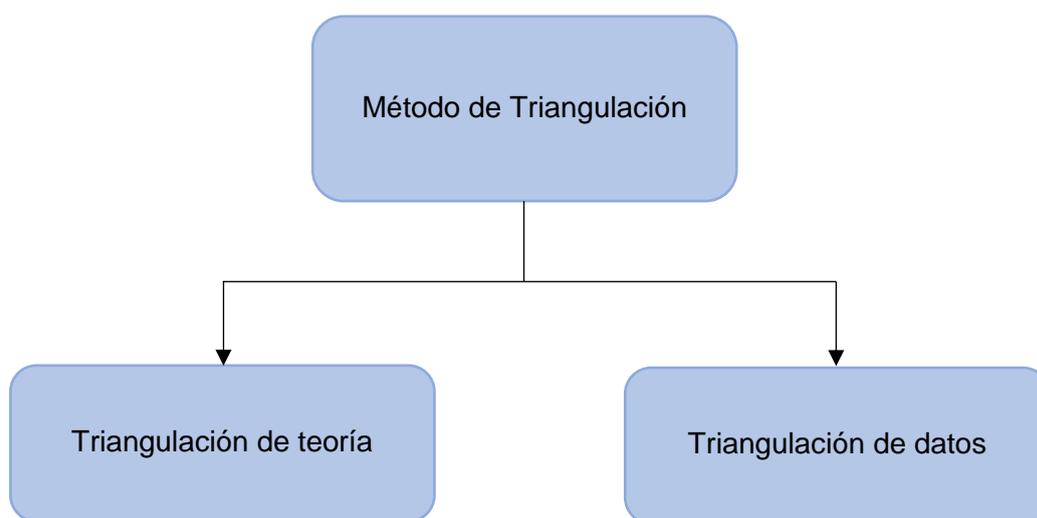
Para el presente estudio de investigación se usó el procedimiento de búsqueda nacional e internacional en el idioma de inglés sobre los métodos para la activación de los Persulfatos Peroximonosulfato y Peroxidisulfato por Materiales Carbonosos

para la Eliminación de Contaminantes Orgánicos del Suelo; donde, de acuerdo a los problemas y objetivos específicos, se dividió en categorías y sub categorías que se muestran a continuación:

Categorías: Los materiales carbonosos, la activación de los persulfatos usando carbono dopados, la activación de los persulfatos usando carbono soportados con metal.

Sub categorías: Nanotubos de carbono, Biochar y Nanodiamantes prístinos, Carbonos dopados con N, Carbonos dopados con S, Carbonos dopados con B, Carbonos dopados con P, Metal-, Carbón, Metal-Nitrógeno-Carbono

**Grafico N°1. Métodos de análisis de información**



### **3.9 Aspectos éticos**

Para el cumplimiento de aspectos éticos se hizo uso de:

Respaldando la autenticidad del presente trabajo a través del programa Turnitin.

Norma ISO 690, respetando la autoría de la información usada a través del correcto uso de las referencias bibliográficas.

Se respetó la guía de productos observables de la Universidad Cesar Vallejo, cumpliendo con lo dictado dentro de ella.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo al objetivo planteado en el estudio para determinar cuáles son los métodos usados para la activación de persulfatos por materiales carbonosos, se requiere analizar cuáles son los materiales carbonosos para la eliminación de contaminantes orgánicos del agua.

**Tabla N° 4. Materiales carbonosos**

<b>Activador</b>	<b>Concentración del material activador</b>	<b>Persulfato</b>	<b>Contaminante</b>	<b>Degradación</b>	<b>Art.</b>
<b>Biochar</b>	0.2 g/L	PMS = 0.1 g/L	Bisfenol A = 10 mg/L	100 %	Huang Bao Cheng et al., 2018
<b>Biochar</b>	1.0 g/L	PMS = 8 mM	1,4-dioxano = 20.0 µM	84.2 %	Ouyang Da et al., 2019
<b>Biochar</b>	0.2 g/L	PDS = 0.5 g/L	2,4-diclorofenol = 100 mg/L	98 %	Yu Jiangfan et al., 2020
<b>Derivado de lodos biochar</b>	1 g/L	PMS = 0.8 mM	Triclosán = 0.034 mM	100 %	Wang S. y Wang J., 2019
<b>Derivado de lodos biochar</b>	2 g/L	PDS = 1.5 mM	Sulfametoxazol = 40 µM	94.6 %	Yin Renli et al., 2019
<b>Nanotubo de carbón (CNT)</b>	0.1 g/L	PDS = 0.031 mM	2,4-DCP = 0.031 mM	95.9 %	Chen Xin et al., 2017
<b>Nanotubo de carbón (CNT)</b>	50 mg/L	PMS = 500 µM	Bromofenoles = 10 µM	100 %	Guan Chaoting et al., 2018
<b>Carbón activado (AC)</b>	5 g/L	PDS = 2.5 mM	P-cloroanilina = 0.5 mM	100 %	Cheng Xin et al., 2019
<b>Carbón activado granulado (GAC)</b>	5 g/L	PDS = 10 g/L	Metronidazol = 100 mg/L	80 %	Forouze sh M. et al., 2019

<b>Fibra de carbón activado (ACF)</b>	0.3 g/L	PDS = 1.76 mM	Naranja G = 0.044 mM	96%	Chen Jiabin et al., 2016
<b>Nanodiamantes prístinos (ND)</b>	0.2 g/L	PMS = 6.5 mM	Fenol = 20 ppm	100%	Duan Xiaoguang et al., 2016
<b>Nanodiamantes prístinos (ND)</b>	0.2 g/L	PDS = 6.5 mg/L	Fenol = 20 mg/L	100%	Duan Xiaoguang et al., 2016
<b>Nanodiamantes prístinos (ND)</b>	0.1 g/L	PDS = 1 mM	Fenol = 0.01 mM	100%	Lee Hongshin et al., 2016
<b>Nanodiamantes prístinos (ND)</b>	0.1 g/L	PMS = 2 g/L	Fenol = 20 mg/L	100 %	Duan Xiaoguang et al., 2018
<b>Carbono mesoporoso tridimensional (CMK)</b>	0.2 g/L	PDS = 6.5 mM	Fenol = 20 mg/L	100%	Duan et al., 2018
<b>Carbono mesoporoso tridimensional (CMK) – 3</b>	0.2 g/L	PDS = 2 g/L	2,4-diclorofenol = 200 mg/L	90 %	Tang Lin et al., 2018
<b>Esferas de carbón</b>	0.2 g/L	PMS = 2 g/L	Fenol = 20 mg/L	40 %	Wang Yuxian et al., 2016

*Elaboración propia*

De acuerdo con la tabla 4 los materiales carbonosos para eliminar contaminantes orgánicos del agua son el biochar y el carbón activado; siendo esto demostrado por el 60% de los investigadores.

Esto es debido a que tanto los biocarbones como carbones activados son ampliamente usados como adsorbentes y catalizadores en la remediación ambiental porque son baratos, ampliamente disponibles y fáciles de preparar (Huang Wei Hao et al., 2021, p.1). Además, los biocharres son el producto sólido de la biomasa bajo tratamiento de pirólisis o gasificación, cuyos precios mayoristas son más bajos que

los carbones activados comerciales y otros materiales finos que se utilizan actualmente (Liew Rock Keey et al., 2019, p.2).

Lo que es corroborado por Chen Jiabin et al., 2016, quien utilizó la fibra de carbón activado (ACF) como catalizador verde para activar el persulfato (PS) para la decoloración oxidativa del colorante azoico y obtuvo que el ACF demostró una mayor actividad que el carbón activado (AC) para activar PS para decolorar Orange G (OG).

Así también, Huang Bao Cheng et al., 2018 y Yu Jiangfang et al., 2020, respaldan los resultados presentados; siendo para ellos que el proceso de oxidación avanzada basado en persulfato es una tecnología prometedora para el tratamiento del agua, mientras que su efectividad depende principalmente de la eficiencia de activación de los catalizadores y el rendimiento oxidante derivado del persulfato; por tal motivo, es muy deseable la exploración de activadores eficaces y rentables para la descomposición del persulfato, siendo para ambos estudios demostrado que el biocarbón, que se sintetizó a través de una sencilla pirólisis de lodos de depuradora en un solo recipiente, es un activador de persulfato eficaz para la degradación de contaminantes.

Además, entre la amplia variedad de materiales usados para la elaboración del biocarbon se encuentran los lodos activados, bambú, cáscaras de frutos secos, cáscaras de crustáceos, entre otros; donde ello es corroborado por Wang S. y Wang J., 2019, Yin Renli et al., 2019 y Cheng Xin et al., 2019, quienes aprueban su efectividad catalítica.

Por ejemplo, el biochar derivado de lodos por Wang S. y Wang J., 2019 presentó un 100% de degradación cuando fue aplicado como activador del peroximonosulfato para eliminar Triclosán.

Además, también se sabe que, en comparación con el carbón activado, la fibra de carbón activado (ACF) presenta características de fuerte capacidad de adsorción y fácil desorción (Zhao Qingxia et al., 2017, p.4).

Por otro lado, se buscó definir la activación de los persulfatos usando materiales de carbono dopados con heteroátomos y sin dopar para la degradación de contaminantes orgánicos, para lo cual se realizaron las comparaciones en la tabla 5

**Tabla N°5.**

<b>Activador</b>	<b>Tiempo de reacción</b>	<b>Persulfato</b>	<b>Contaminante</b>	<b>Degradación</b>	<b>Art.</b>
<b>Grafeno dopado con N (NG)</b>	45 min.	PMS = 2 g/L	Fenol	100 %	Duan Xiaoguang et al., 2016
<b>Grafeno</b>	180 min.	PMS = 2 g/L	Fenol	70%	
<b>Grafeno dopado con N (NG)</b>	90 min.	PMS = 2 g/L	Fenol	100 %	Wang Chen et al., 2016
<b>Grafeno</b>	180 min.	PMS = 2 g/L	Fenol	56 %	
<b>Grafeno dopado con N (NG)</b>	30 min.	PMS = 1 g/L	Fenol	100 %	Liang Ping et al., 2017
<b>Grafeno</b>	180 min.	PMS = 1 g/L	Fenol	10 %	
<b>Grafeno dopado con N (NG)</b>	180 min.	PDS = 2 g/L	Fenol	76 %	Zheng W. et al., 2019
<b>Grafeno</b>	180 min.	PDS = 2 g/L	Fenol	35 %	
<b>Grafeno dopado con N (NG)</b>	60 min.	PMS = 0.5 mM	Sulfacetamida	95 %	Chen Xiao et al., 2018
<b>Óxido de grafeno</b>	60 min.	PMS = 0.5 mM	Sulfacetamida	40 %	
<b>Aerogeles de grafeno dopado con nitrógeno (NGA)</b>	180 min.	PMS = 2 g/L	Ibuprofeno	90%	Wang Jun et al., 2019
<b>Aerogel de grafeno (GA)</b>	180 min.	PMS = 2 g/L	Ibuprofeno	5.2 %	

Óxido de grafeno reducido dopado con nitrógeno (N-rGO)	2.5 h.	PDS = 2 g/L	Sulfacloropiridazina	100 %	Kan Jian et al., 2016
Óxido de grafeno reducido (rGO)	3 h.	PDS = 2 g/L	Sulfacloropiridazina	65 %	
Óxido de grafeno (GO)	3 h.	PDS = 2 g/L	Sulfacloropiridazina	16 %	
Óxido de grafeno reducido dopado con nitrógeno (N-rGO)	7 min.	PMS = 0.08 mM	Bisfenol A	96 %	Wang Xiaobo et al., 2017
Óxido de grafeno reducido (rGO)	7 min.	PMS = 0.08 mM	Bisfenol A	26 %	
Óxido de grafeno dopado con nitrógeno (NGO)	180 min.	PDS = 1 mM	Fenol	96 %	Pedrosa Marta et al., 2019
Óxido de grafeno (GO)	180 min.	PDS = 1 mM	Fenol	30 %	
Carbones porosos dopados con diferentes contenidos de nitrógeno (NPCs)	50 min.	PMS = 1.6 mM	Fenol	100 %	Wang Guanlong et al., 2017
Carbones porosos (PCs)	60 min.	PMS = 1.6 mM	Fenol	73 %	

*Elaboración propia*

De acuerdo con la tabla 5 el dopaje de heteroátomos en los materiales carbonosos mejora significativamente la actividad catalítica del peroximonosulfato (PMS) y peroxidisulfato (PDS) para eliminar los contaminantes orgánicos, ya que, estos heteroátomos pueden introducir más sitios activos, mejorar la transferencia de electrones y aumentar los bordes defectuosos (Liu Banghai et al., 2020, p.1).

Así mismo, el dopaje con nitrógeno es el método preferido de dopaje con heteroátomos debido a la similitud de tamaño y al fuerte enlace entre los átomos de nitrógeno y de carbono; siendo esto corroborado por el 100% de los investigadores encontrado en la tabla 5.

Esto es corroborado por Duan Xiaoguang et al., 2016, Wang Chen et al., 2016, Liang Ping et al., 2017, Zheng W. et al., 2019, Chen Xiao et al., 2018, Wang Jun et al., 2019, Kan Jian et al., 2016, Wang Xiaobo et al., 2017, Pedrosa Marta et al., 2019, Wang Guanlong et al., 2017, para quienes el carbono dopado con N se ha convertido en el material carbonoso más estudiado para la activación del persulfato.

Ello es también corroborado con lo descubierto por Wang Jun et al., 2019, quien en su investigación encontró que el aerogel de grafeno dopado con nitrógeno exhibió excelentes actividades catalíticas en la activación de peroximonosulfato (PMS) para la degradación oxidativa del ibuprofeno (IBP); donde el NGA logró una mejora de 44 y 8 veces en la velocidad de reacción sobre el aerogel de grafeno (GA).

La catálisis superior de la NGA puede atribuirse a los efectos sinérgicos del marco poroso 3D y el dopaje de N en la NGA hibridada con  $sp^2$ ; lo que demuestra, que el N gráfico es el sitio activo intrínseco en la activación del PMS (Pedrosa Marta et al., 2019).

Long Y. et al., (2019, p.4), reparó biocarbón gráfico poroso dopado con B (B-KBC) y se usó para activar peroxidisulfato (PDS) para la eliminación de sulfametoxazol (SMX); siendo revelado mediante los resultados experimentales y teóricos que la introducción de especies de boro no solo actúan como sitios de ácido de Lewis que mejoran la afinidad de la superficie hacia el PDS, sino que también, modulan la estructura electrónica de la matriz de carbono, lo que evidentemente aumenta la tasa de transferencia de electrones y, por lo tanto, da como resultado una excelente capacidad catalítica. Más importante aún, debido a los sitios de boro de alta

estabilidad, B-KBC otorga una durabilidad superior a largo plazo en comparación con los catalizadores de carbono dopados con N populares.

Los resultados a los cuales se han llegado están respaldados por Wang Chen et al., 2016 quien realizó la comparación de Grafeno dopado con N (NG) y Grafeno sin dopar, para la activación del peroximonosulfato (PMS), obteniendo un porcentaje de degradación del 100% con NG y 56% para grafeno sin dopar; así también y Liang Ping et al., 2017; demuestra entre el Grafeno dopado con N (NG) y el

Grafeno sin dopar para la activación también del PMS, como el primero caso presentó un porcentaje de degradación del 100%, mientras que uno sin dopar presenta un 10%.

Por último, la activación de los persulfatos usando materiales de carbono soportados con metal para la degradación de contaminantes orgánicos se clasificó en la tabla 6.

**Tabla N°6.** Activación de los persulfatos usando materiales de carbono soportados con metal

ACTIVADOR	DOSIS DEL MATERIAL ACTIVADO O CATALIZADOR	PERSULFATO	CONTAMINANTE / CONCENTRACIÓN	DEGRADACIÓN	ART.
Metal-Carbono Co-CS	0.1 g/L	PMS	Trimetoprim = 5 mg/L	96.5%	Liu Yang et al., 2019
Material híbrido magnético de carbono y cobalto (MC/Co)	50 mg/L	PMS	Caferina = 50 mg/L	92 %	Lin Kun Yi A. y Chen Bo J., 2017
Nanocompuestos de óxido de cobalto y grafeno (Co 3 O 4 /grafeno)	0.05 g/L	PMS	Naranja II = 0.3 mM	100 %	Wang Chengxi an et al., 2016

<b>Nanocompuestos de óxido de cobalto y grafeno (Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/grafeno)</b>	0.05 g/L	PMS	Naranja II = 0.2 mM	100 %	Zhou X. et al., 2016
<b>Carbón hueco soportado por nanopartículas ultrafinas de Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (HCo<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/C)</b>	0.1 g/L	PMS	Bisfenol A = 87.6 µM	97 %	Khan Muhammad A. et al., 2019
<b>carbono mesoporoso ordenado dopado con CoOx (Co-OMC)</b>	0.1 g/L	PMS	Fenol = 20 mg/L	100 %	Wang Yanbin et al., 2017
<b>Carbón grafitizado con Fe<sub>0</sub></b>	0.6 g/L	PMS	Bisfenol A = 20 ppm	100 %	Li Miaoling et al., 2019
<b>Biocarbón grafitizado con Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub></b>	0.2 g/L	PMS	ácido p-hidroxibenzoico = 10 mg/L	100 %	Fu Haichao et al., 2019
<b>nFe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-biochar</b>	2 g/L	PDS	1,4-dioxano = 20.0 µM	98 %	Ouyang Da et al., 2017
<b>Óxido de grafeno reducido bidimensional (2D rGO) MnO<sub>2</sub>/rGO</b>	0.1 g/L	PMS	4-nitrofenol = 50 mg/L	100 %	Wang Yuxian et al., 2016
<b>NiFe<sub>2</sub>-xCo<sub>x</sub>O<sub>4</sub>-rGO</b>	0.4 g/L	PDS	Bisfenol A = 0.1 mM	100 %	Xu Xiangyang et al., 2019
<b>NiO-NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>-rGO</b>	1.5 g/L	PMS	Rodamina B = 20.16 mg/L	100 %	Xu Xiaochen et al., 2019

### *Elaboración propia*

De acuerdo a la comparación y clasificación de la activación de los persulfatos usando materiales de carbono soportados con metal para la degradación de contaminantes orgánicos presentados en la tabla 6, se tiene que el uso de metales de transición como activadores de peroximonosulfato (PMS) y peroxidisulfato (PDS) son eficientes por su alta efectividad y su relativamente fácil disponibilidad.

Además, sustancias de hierro son las más usadas como activadores de PMS/PDS y los porcentajes de degradación son mayores al 90%, ello debido a que la gran superficie y la alta estabilidad de los materiales de carbono los hacen ideales para actuar como soportes de metales de transición (Xiao Peng Fei et al., 2020, p.2).

Pero ello es rechazado por Lin Kun Yi A. y Chen Boa j., (2017, p.5); quien afirma que la desventaja es que la lixiviación de los metales y, por tanto, la producción de lodos es inevitable hasta ahora, lo que provoca una contaminación secundaria; además, son propensos a agregarse debido a la alta energía superficial, especialmente en el caso de las nanopartículas.

Así también lo comprueba Wang Chengxian et al., 2016, quien afirma que los nanocompuestos de óxido de cobalto y grafeno ( $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{grafeno}$ ) se fabrican como catalizadores heterogéneos para acelerar la generación de radicales sulfato en la degradación de Orange II y el  $\text{Co}_3\text{O}_4$  o el grafeno exhiben únicamente una ligera actividad catalítica, pero su híbrido ( $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{grafeno}$ ) degrada y elimina eficientemente Orange II de una solución acuosa en presencia de peroximonosulfato (PMS); donde lo demuestra con la degradación al 100% del anaranjado II en 7 minutos, utilizando los catalizadores compuestos.

Apoyando la afirmación anterior Zhou X. et al., 2016, sintetizó compuestos de  $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{grafeno}$  encontrando su alta actividad catalítica para la activación de peroximonosulfato para remover el colorante azo (Naranja II) en soluciones acuosas, corroborándolo con los resultados obtenidos, donde los compuestos de  $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{grafeno}$  degradaron completamente (100%) las soluciones de Orange II en 10 minutos.

Por su parte Xu Xiangyang et al., 2019, menciona que, en comparación con los catalizadores informados recientemente, NiFe<sub>0.7</sub>Co<sub>1.3</sub>O<sub>4</sub>-RGO 1 exhibe una

actividad catalítica impresionantemente mayor, lo que lleva a una degradación mucho más rápida de BPA con bastante menos PS utilizado; siendo ello corroborado con los resultados presentados en su estudio, donde el bisfenol A se eliminó por completo mediante NiFe 0.7 Co 1.3 O 4 -RGO/PS en 25 min.

Lo cual también es apoyado por Xu Xiaochen et al., 2019, quien utilizó como material catalizador y activador del PMS al NiO-NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>-rGO, logrando una eficiencia de eliminación del 100 % para 20.16 mg/L del contaminante Rodamina B.

## V. CONCLUSIONES

El presente estudio tuvo como objetivo determinar cuáles son los métodos usados para la activación de persulfatos por materiales carbonosos, concluyendo que sea la activación del peroximonosulfato (PMS) o peroxidisulfato (PDS) mediante materiales carbonosos, o materiales carbonosos dopados con heteroátomos y soportados con metal presentan mayores eficiencias en la eliminación de contaminantes orgánicos del suelo, en comparación de los que no presentan activación. Siendo detallando a continuación:

De acuerdo con los materiales carbonosos para la eliminación de contaminantes orgánicos del agua se tiene que los catalizadores de materiales de carbono libres de metales en la producción de radicales sulfatos han presentado óptimos resultados, demostrándose que estos materiales son alternativas prometedoras a los catalizadores basados en metales convencionales. Además, los materiales carbonosos para eliminar contaminantes orgánicos del agua son el biochar y el carbón activado; siendo esto demostrado por el 60% de los investigadores.

Se puede concluir que las actividades catalíticas de los materiales carbonosos mejoran significativamente tras el dopaje con los heteroátomos, además, el dopaje de heteroátomos en los materiales carbonosos mejora significativamente la actividad catalítica del peroximonosulfato (PMS) y peroxidisulfato (PDS) para eliminar los contaminantes orgánicos.

Por último, los compuestos metálicos novedosos y respetuosos con el medio ambiente soportados en carbono son deseables para la activación de PMS/PDS, sustancias de hierro son las más usadas como activadores de PMS/PDS y los porcentajes de degradación son mayores al 90%, ello debido a que la gran superficie y la alta estabilidad de los materiales de carbono los hacen ideales para actuar como soportes de metales de transición.

## **VI. RECOMENDACIONES**

En base a la revisión realizada y los 95 estudios analizados se puede realizar a los futuros investigadores las siguientes recomendaciones:

Se recomienda ampliar en estudios que se enfoquen en la remediación verde para la eliminación de antibióticos en las aguas residuales sin producir ninguna lixiviación de metales pesados como contaminación secundaria.

Se requiere estudiar los reactores en los que se llevan a cabo los experimentos para examinar la activación de PMS y PDS por materiales carbonosos, como podrían ser los reactores discontinuos, reactor de lecho, entre otros; debido a que esto ayuda a obtener una aplicación práctica del método.

Para su aplicación, los estudios futuros también deberían ampliarse para investigar los métodos de activación híbridos y la optimización de las condiciones de reacción para lograr la máxima eliminación de contaminantes orgánicos contaminantes orgánicos.

## REFERENCIAS

1. Alharbi, O. M. L., Basheer, A. A., Khattab, R. A., & Ali, I. (2018). Health and environmental effects of persistent organic pollutants. *Journal of Molecular Liquids*, 263, 442-453. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.05.029>
2. Bekris, L., Frontistis, Z., Trakakis, G., Sygellou, L., Galiotis, C. & Mantzavinos, D. (2017). Graphene: a new activator of sodium persulfate for the advanced oxidation of parabens in water. *Water research*, 126, 111-121. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.09.020>
3. Chen, J., Hong, W., Huang, T., Zhang, L., Li, W. & Wang Y. (2016). Activated carbon fiber for heterogeneous activation of persulfate: implication for the decolorization of azo dye. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(18), 18564-18574. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7015-4>
4. Chen, X., Da oh, W., Ting Hu, Z., Miao Sun, Y., Webster, R. D., Zhou Li, S. & Thye Lim, T. (2018). Enhancing sulfacetamide degradation by peroxymonosulfate activation with N-doped graphene produced through delicately-controlled nitrogen functionalization via tweaking thermal annealing processes. *Applied Catalysis B: Environmental*, 225, 243-257. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.11.071>
5. Cheng, X., Guo, H., Zhang, Y., Wu, Xiao. & Liu, Y. (2017). Non-photochemical production of singlet oxygen via activation of persulfate by carbon nanotubes. *Water research*, 113, 80-88. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.02.016>
6. Cheng, X., Guo, H., Zhang, Y., Korshin, G. V. & Yang, B. (2019). Insights into the mechanism of nonradical reactions of persulfate activated by carbon nanotubes: Activation performance and structure-function relationship. *Water research*, 157, 406-414. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.03.096>
7. Da Silva, J. J., Ferreira Da Silva, B., Ramos Stradiotto, N., Petrovic, M., Gros, M. & Ferrero, P. G. (2021). Identification of organic contaminants in vinasse and in soil and groundwater from fertigated sugarcane crop areas using target and suspect screening strategies. *Science of The Total Environment*, 761, 143237. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143237>

8. Dos Santos, E. V., Saez, C., Cañizarez, P., Martinez Huitle, C. A. & Rodrigo. M. A. (2017). Reversible electrokinetic adsorption barriers for the removal of atrazine and oxyfluorfen from spiked soils. *Journal of hazardous materials*, 322, 413-420. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.10.032>
9. Du, X., Zhang, Y., Si, F., Yao, CH., Du, M., Hussain, I., Kim, H., Huang, S., Lin, Z. & Hayat, W. (2019). Persulfate non-radical activation by nano-CuO for efficient removal of chlorinated organic compounds: Reduced graphene oxide-assisted and CuO (0 0 1) facet-dependent. *Chemical Engineering Journal*, 356, 178-189. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.08.216>
10. Duan, X., Ao, Z., Sun, H., Indrawirawan, S., Wang, Y., Kang, J., Liang, F., Zhu, Z. H. & Wang S. (2015). Nitrogen-doped graphene for generation and evolution of reactive radicals by metal-free catalysis. *ACS applied materials & interfaces*, 7( 7), 4169-4178. <https://doi.org/10.1021/am508416n>
11. Duan, X., Ao, Z., Li, D., Sun, H., Zhou, L., Suvorova, A., Saunders, M., Wang, G. & Wang, S. (2016). Surface-tailored nanodiamonds as excellent metal-free catalysts for organic oxidation. *Carbon*, 103, 404-411. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2016.03.034>
12. Duan, X., Ao, Z., Zhang, H., Saunders, M., Sun, H., Shao, Z. & Wang, S. (2018). Nanodiamonds in sp<sup>2</sup>/sp<sup>3</sup> configuration for radical to nonradical oxidation: Core-shell layer dependence. *Applied Catalysis B: Environmental*, 222, 176-181. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.10.007>
13. Duan, X., Su, CH., Zhou, L., Sun, H., Suvorova, A., Odedairo, T., Zhu, Z., Shao, Z. & Wang SH. (2016). Surface controlled generation of reactive radicals from persulfate by carbocatalysis on nanodiamonds. *Applied Catalysis B: Environmental*, 194, 7-15. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2016.04.043>
14. Duan, X., Sun, H., Tade, M. & Wang SH. (2018). Metal-free activation of persulfate by cubic mesoporous carbons for catalytic oxidation via radical and nonradical processes. *Catalysis Today*, 307, 140-146. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2017.04.038>

15. Durante, C. A., Santos Neto, E. B., Azevedo, A., Crespo, E. A. & Lailson Brito, J. (2016). POPs in the South Latin America: Bioaccumulation of DDT, PCB, HCB, HCH and Mirex in blubber of common dolphin (*Delphinus delphis*) and Fraser's dolphin (*Lagenodelphis hosei*) from Argentina. *Science of the Total Environment*, 572, 352-360. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.176>
16. Fang, G., Liu, C., Gao, J., Dionysios, D. & Zhou, D. (2015). Manipulation of persistent free radicals in biochar to activate persulfate for contaminant degradation. *Environmental science & technology*, 49(9), 5645-5653. <https://doi.org/10.1021/es5061512>
17. Fdez Sanromán, A., Pazos, M., Rosales, E. & Sanromán, M. A. (2021). Prospects on integrated electrokinetic systems for the decontamination of soil polluted by organic contaminants. *Current Opinion in Electrochemistry*, 100692. <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2021.100692>
18. Forouzesh, M., Ebadi, A. & Aghaeinejad Meybodi, A. (2019). Degradation of metronidazole antibiotic in aqueous medium using activated carbon as a persulfate activator. *Separation and purification technology*, 210, 145-151. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.07.066>
19. FU, H., Zhao, P., Xu, S., Cheng, G., Li, Z., Li, Y., Li, K. & Ma, S. (2019). Fabrication of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> and graphitized porous biochar composites for activating peroxymonosulfate to degrade p-hydroxybenzoic acid: Insights on the mechanism. *Chemical Engineering Journal*, 375, 121980. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.121980>
20. Gauquie, J., Devriese, L., Robbens, J. & De Witte, B. (2015). A qualitative screening and quantitative measurement of organic contaminants on different types of marine plastic debris. *Chemosphere*, 138, 348-356. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.06.029>
21. Guan, Ch., Jiang, J., Luo, C., Pang, S., Yang, Y., Wang, ZH., Ma, J., Yu, J. & Zhao, X. (2018). Oxidation of bromophenols by carbon nanotube activated peroxymonosulfate (PMS) and formation of brominated products: Comparison to peroxydisulfate (PDS). *Chemical Engineering Journal*, 337, 40-50. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.12.083>

22. Guo, F., Lu, J., Liu, Q., Zhang, P., Zhang, A., Cai, Y. & Wang, Q. (2018). Degradation of Acid Orange 7 by peroxymonosulfate activated with the recyclable nanocomposites of g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> modified magnetic carbon. *Chemosphere*, 205, 297-307. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.04.139>
23. Guo, Y. & Kannan, K. (2015). Chapter 1 - Analytical methods for the measurement of legacy and emerging persistent organic pollutants in complex sample matrices. *Comprehensive analytical chemistry*, 67, 1-56. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63299-9.00001-6>
24. He, Y., Yao, T., Tan, SH., Yu, B., Liu, K., Hu, L., Luo, K., Liu, M., Liu, X. & Bai, L. (2019). Effects of pH and gallic acid on the adsorption of two ionizable organic contaminants to rice straw-derived biochar-amended soils. *Ecotoxicology and environmental safety*, 184, 109656. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109656>
25. Hu, L., Zhang, G., Liu, M., Wang, Q. & Wang, P. (2018). Optimization of the catalytic activity of a ZnCo<sub>2</sub>O<sub>4</sub> catalyst in peroxymonosulfate activation for bisphenol A removal using response surface methodology. *Chemosphere*, 212, 152-161. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.08.065>
26. Huang, B. Ch., Jiang J., Huang, G. X. & Yu, H. Q. (2018). Sludge biochar-based catalysts for improved pollutant degradation by activating peroxymonosulfate. *Journal of Materials Chemistry A*, 6(19), 8978-8985. <https://doi.org/10.1039/C8TA02282H>
27. Huang, D., [Gao, L.](#), [Zheng, M.](#), [Qiao, L.](#), [Xu, Ch.](#), [Wang, K.](#) & Wang, Sh., (2021). Screening organic contaminants in soil by two-dimensional gas chromatography high-resolution time-of-flight mass spectrometry: A non-target analysis strategy and contaminated area case study. *Environmental Research*, 205, 112420. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112420>
28. Huang, W. H., Lee, D. J. & Huang, Ch. (2019). Modification on biochars for applications: A research update. *Bioresource Technology*, 319, 124100. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124100>

29. Hüffer, T., Metzelder, F., Sigmund, G., Slawek, S., Schmidt, T. C. & Hofmann T. (2019). Polyethylene microplastics influence the transport of organic contaminants in soil. *Science of the Total Environment*, 657, 242-247. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.047>
30. Jiménez, J. C., Dachs, J. & Eisenreich, S. J. (2015). Atmospheric deposition of POPs: Implications for the chemical pollution of aquatic environments. *Comprehensive Analytical Chemistry*, 67, 295-322. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63299-9.00008-9>
31. Kang, J., Duan, X., Zhou, L., Sun, H., Tadé, M. O. & Wang, Sh. (2016). Carbocatalytic activation of persulfate for removal of antibiotics in water solutions. *Chemical Engineering Journal*, 288, 399-405. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.12.040>
32. Khan, M. A. Na., Klu, P. K., Wang, Ch., Zhang, W., Luo, R., Zhang, M., Qi, J., Sun, X., Wang, L. & Li, J. (2019). Metal-organic framework-derived hollow Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/carbon as efficient catalyst for peroxymonosulfate activation. *Chemical Engineering Journal*, 363, 234-246. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.01.129>
33. Kermani, M., Mohammadi, F., Kakavandi, B., Esrafil, A. & Rostamifasih, Z. (2018). Simultaneous catalytic degradation of 2, 4-D and MCPA herbicides using sulfate radical-based heterogeneous oxidation over persulfate activated by natural hematite ( $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PS). *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 117, 49-59. <https://doi.org/10.1016/j.jpics.2018.02.009>
34. Lee, H., Kim, H. I., Weon, S., Choi, W., Hwang, Y. S., Seo, J., Lee, Ch. & Kim, J. H. (2016). Activation of persulfates by graphitized nanodiamonds for removal of organic compounds. *Environmental science & technology*, 50(18), 10134-10142. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b02079>
35. Li, D., Duan, X., Sun, H., Kang, J., Zhang, H., Tade, M. O. & Wang, Sh. (2017). Facile synthesis of nitrogen-doped graphene via low-temperature pyrolysis: the effects of precursors and annealing ambience on metal-free catalytic oxidation. *Carbon*, 115, 649-658. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.01.058>

36. Li, M., Luo, R., Wang, Ch., Zhang, M. Zhang, W., Klu, K. P., Yan, Y., Qi, J., Sun, X., Wang, L. & Li. J. (2019). Iron-tannic modified cotton derived Fe<sub>0</sub>/graphitized carbon with enhanced catalytic activity for bisphenol A degradation. *Chemical Engineering Journal*, 372, 774-784. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.04.187>
37. Liang, P., Zhang, Ch., Duan, X., Sun, H., Liu, Sh. Tade, M. O. & Wang Sh. (2017). An insight into metal organic framework derived N-doped graphene for the oxidative degradation of persistent contaminants: formation mechanism and generation of singlet oxygen from peroxymonosulfate. *Environmental Science: Nano*, 4(2), 315-324. <https://doi.org/10.1039/C6EN00633G>
38. Liew, R. K., Chai, C., Yuh, Y. P. N., Phang, X. Y., Chong, M. Y., Nam, W. L., Su, M. H., Lam, W. H., Ma, N. L. & Lam, S. Sh. (2019). Innovative production of highly porous carbon for industrial effluent remediation via microwave vacuum pyrolysis plus sodium-potassium hydroxide mixture activation. *Journal of cleaner production*, 208, 1436-1445. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.214>
39. Lin, K. Y. A. & Chen, B. J. (2017). Magnetic carbon-supported cobalt derived from a Prussian blue analogue as a heterogeneous catalyst to activate peroxymonosulfate for efficient degradation of caffeine in water. *Journal of colloid and interface science*, 486, 255-264. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2016.09.073>
40. Liu, B., Gou, W., Wang, H., Si, Q., Zhao, Q., Luo, H., & Ren, N. (2020). B-doped graphitic porous biochar with enhanced surface affinity and electron transfer for efficient peroxydisulfate activation. *Chemical Engineering Journal*, 396, 125119. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125119>
41. Liu, Ch., Chen, L., Ding, D., & Cai, T. (2019). From rice straw to magnetically recoverable nitrogen doped biochar: Efficient activation of peroxymonosulfate for the degradation of metolachlor. *Applied Catalysis B: Environmental*, 254, 312-320. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2019.05.014>
42. Liu, Y., Gou, H., Xhang, Y., Cheng, X., Xhou, P., Deng, J., Wang, j., & Li, W. (2019). Highly efficient removal of trimethoprim based on peroxymonosulfate

- activation by carbonized resin with Co doping: Performance, mechanism and degradation pathway. *Chemical Engineering Journal*, 356, 717-726. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.09.086>
43. Long, Y., Bu, S., Huang, Y., Shao, Y., Xiao, L., & Shi, X. (2019). N-doped hierarchically porous carbon for highly efficient metal-free catalytic activation of peroxydisulfate in water: A non-radical mechanism. *Chemosphere*, 216, 545-555. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.10.175>
44. Lu, X., Shao, Y., Gao, N., Chen, J., Deng, H., Chu, W., An, A., & Peng, F. (2018). Investigation of clofibric acid removal by UV/persulfate and UV/chlorine processes: Kinetics and formation of disinfection byproducts during subsequent chlor (am) ination. *Chemical Engineering Journal*, 331, 364-371. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.08.117>
45. Maeng, S. K., Park, J. W., Noh, J. H., Wong, S. Y., & Song, K. G. (2021). Dissolved organic matter characteristics and removal of trace organic contaminants in a multi-soil-layering system. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9, 4, 105446. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105446>
46. Manamsa, K., Crane, E., Stuart, M., Talbot, J., Lapworth, D., & Hart, A. (2016). A national-scale assessment of micro-organic contaminants in groundwater of England and Wales. *Science of the Total Environment*, 568, 712-726. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.017>
47. Mandal, S., Kunhikrishnan, A., Bolan, N. S., Wijesekara, H., & Naidu, R. (2016). Application of biochar produced from biowaste materials for environmental protection and sustainable agriculture production. *Environmental Materials and Waste. Academic Press*, 73-89. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803837-6.00004-4>
48. Morales, M. E., Gocoli, G. A., Villamil, M. A., & Zabaloy, M. C. (2021). Efecto de los cultivos de cobertura invernales sobre el microbioma del suelo: revisión sistemática de la literatura. *Revista Argentina de Microbiología*. 57-70. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2021.02.008>

49. Ouyang D., Chen Y., Yan J, Qian L, Han L., Chen M. (2019) Activation mechanism of peroxymonosulfate by biochar for catalytic degradation of 1, 4-dioxane: Important role of biochar defect structures. *Chemical Engineering Journal*, 614-624. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.03.235>
50. Ouyang D., Qian L, Chen Y., Zhang W., Ni H., Mengfang (2017). Degradation of 1, 4-dioxane by biochar supported nano magnetite particles activating persulfate. *Chemosphere*, 609-617. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.05.156>
51. Pedrosa, M., Goran D., Tavares. P., Figueiredo J.L. Silva A., (2019) Metal-free graphene-based catalytic membrane for degradation of organic contaminants by persulfate activation. *Chemical Engineering Journal*, 2019, vol. 369, p. 223-232. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.02.211>
52. Pete S., Bustamante M., Sobocká J., Adhya T., Rumpel C, paustian K., Kuikman P., Francesca Cotrufo, Roberto I. Griffiths, Asakawa S., Bondeau A., Atul K. Jain, Meersman J., Thomas (2016) Global change pressures on soils from land use and management. *Global change biology*, 1008-1028. <https://doi.org/10.1111/gcb.13068>
53. Peidong, H. & Mingce, L. (2016) Cobalt-catalyzed sulfate radical-based advanced oxidation: a review on heterogeneous catalysts and applications. *Applied Catalysis B: Environmental*, 181, 103-117. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2015.07.024>
54. Ping S., Liu H., Zhai Z., Zhang X., Yingsen C., Tan J., Wu J. (2019) Degradation of UV filter BP-1 with nitrogen-doped industrial graphene as a metal-free catalyst of peroxymonosulfate activation. *Chemical Engineering Journal*, 262-271. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.09.023>
55. Qian, L, Liu P., Wang M, Zhan X., Gao S. (2019) et al. An efficient graphene supported copper salen catalyst for the activation of persulfate to remove chlorophenols in aqueous solution. *Chemical Engineering Journal*, vol. 54-63. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.11.208>

56. Ren W., Chen C., Shao P., Lou X., Zhang H., Shaobin W. Duan X. (2021) Origins of Electron-Transfer Regime in Persulfate-Based Nonradical Oxidation Processes. *Environmental science & technology*, <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c05374>
57. Schaeffer, A., Amelung W., Hollert H., Kaestner M., Kandeler E., Kruse J., Miltner A., Ottermanns R., Pagel H., Peth S., Christian P., Rambold G., Schloter M., Schulz S., Streck T., Nickoll M. (2016). The impact of chemical pollution on the resilience of soils under multiple stresses: conceptual framework for future research. *Science of the Total Environment*, 1076-1085. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.161>
58. Sarma H., Prasad M.NV., (2016) Phytomanagement of polycyclic aromatic hydrocarbons and heavy metals-contaminated sites in Assam, north eastern state of India, for boosting bioeconomy. *En Bioremediation*. Elsevier. 609-626. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802830-8.00024-1>
59. Senthil P. K., Prasannamedha G. (2021) Chapter two - Biological and chemical impacts on marine biology. *Modern Treatment Strategies for Marine Pollution*. Pages 11-27. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822279-9.00006-3>
60. Song, Weiping; Guo, Mingxin. (2014) Residual veterinary pharmaceuticals in animal manures and their environmental behaviors in soils. *Applied manure and nutrient chemistry for sustainable agriculture and environment*. Springer, Dordrecht, 23-52. [https://doi.org/10.1007/978-94-017-8807-6\\_2](https://doi.org/10.1007/978-94-017-8807-6_2)
61. Tang L., Liu Y., Wang J., Zeng G., Deng Y., Dong H., Feng H., Wang J., Peng B. (2018) Enhanced activation process of persulfate by mesoporous carbon for degradation of aqueous organic pollutants: Electron transfer mechanism. *Applied Catalysis B: Environmental* <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2018.02.059>
62. Tian H., Chen CH., Zhu T., Zhu B., Sun Y. (2021) Characterization and degradation mechanism bimetallic, activated persulfate for PAHs-contaminated soil remediation. *Chemosphere*, 128875. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128875>

63. Tijani, J.O., Fabota O., Babadije O., Petrik L.F.(2016) Pharmaceuticals, endocrine disruptors, personal care products, nanomaterials and perfluorinated pollutants: Environmental chemistry letters, 27-49.  
<https://doi.org/10.1007/s10311-015-0537-z>
64. Tsang, D., CW; IRIS, K. M.; Xion,.(2019) Novel application of biochar in stormwater harvesting. En Biochar from Biomass and Waste. Elsevier 319-347. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811729-3.00018-2>
65. Vidal, J.,Carvela M., Saez C., Cañizares P., Navarro V., Salazar R., Rodrigo M.A. (2020) Testing different strategies for the remediation of soils polluted with lindane. Chemical Engineering Journal, 122674.  
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122674>
66. Waclawek S., Lutze H., Grubel K.,Padil V., Cernik M.,Dinisio D.(2017) Chemistry of persulfates in water and wastewater treatment: a review. Chemical Engineering Journal, 44-62.  
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.07.132>
67. Wang, Chen, Shaobin, (2016) One-pot synthesis of N-doped graphene metal-free advanced oxidation processes. Carbon, 279-287.  
<https://doi.org/10.1016/j.carbon.2016.02.048>
68. Wang, Chengxiang, Yulin Mim et al. Synergistic effect of Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles and graphene as catalysts for peroxymonosulfate-based orange II degradation with high oxidant utilization efficiency. The Journal of Physical Chemistry C, 2016, vol. 120, no 1, p. 336-344. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.5b10032>
69. Wang CH., Shi P., Cai X., Xu Q., Zhou X., Yang D., Jinchen V., Min Y., Ge H., Yao W.(2017) Enhanced activation of peroxymonosulfate by nitrogen doped porous carbon for effective removal organic pollutants. Carbon,. 730-739.  
<https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.01.060>
70. Wang, Jun, Xiaoyao (2019) Facile synthesis of N-doped 3D graphene aerogel and it excellent performance in catalytic degradation of antibiotic contaminants in water. Carbon, 781-790. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.01.003>

71. Wang J., Duan X., Dong Q., Meng F., Tan X., Liu SH., Wang Sh.(2019) Activation of peroxymonosulfate by sludge-derived biochar for the degradation of triclosan in water and wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 350-358. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.09.062>
72. Wang, Xiaobo, Xiangyi et al. Simultaneous enhancement of adsorption and peroxymonosulfate activation of Nitrogen-doped reduced graphene oxide for bisphenol removal. *Journal of environmental chemical engineering*, 2017, vol. 5, p. 4291-4297. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.08.018>
73. Wang, Xiao Ping; SUN, DianChao; YAO, TanDong. Climate change and global cycling of persistent organic pollutants: a critical review. *Science China Earth Sciences*, 2016, vol. 59, no 10, p. 1899-1911. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11430-016-5073-0>
74. Wang X., Tang P., Ding C., Cao X., Yuan S., Zou X., Deng X. (2017) Heterogeneous degradation of refractory pollutants by peroxymonosulfate activated by Cox-doped ordered mesoporous carbon. *Chemical Engineering Journal*, 1112-1121. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.07.042>
75. Wang, Yuxian, Hongqi et al. Activation of peroxymonosulfate by carbonaceous oxygen groups: experimental and density functional theory calculations. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2016, vol. 198, p. 295-302. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2016.05.075>
76. Wang Y., Ao Zh., Sun H., Duan X., Whang Sh. (2016) 2D/2D nano-hybrids of  $\gamma$ -MnO<sub>2</sub> on reduced graphene oxide for catalytic ozonation and coupling peroxymonosulfate activation. *Journal of hazardous materials* p. 56-64. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.08.031>
77. Wen-Da oh Zhili dong Teik-Thye lim Generation of sulfate radical through heterogeneous catalysis for organic contaminants removal: current development, challenges and prospects. *Applied Catalysis B: Environmental*, 194, 169-201. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2016.04.003>
78. Wei M., Gao L., Fang J., Cai W., Li X., Xu Ai. (2016) Activation of peroxymonosulfate by graphitic carbon nitride loaded on activated carbon for

organic pollutants degradation. Journal of hazardous materials, 60-68.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.05.031>

79. Wei Z., Villamena, F. A., Linda K. (2017) Kinetics and mechanism of ultrasonic activation of persulfate: in situ EPR spin trapping study. Environmental science & technology, 3410-3417. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b05392>
80. Wu Do., Bai Y., Wang W., Xia H., Tan F., Zhang Sh., Su B., Wang X., Qiao X., Wong K.(2019) Highly pure MgO<sub>2</sub> nanoparticles robust solid oxidant for enhanced Fenton-like degradation of organic contaminants. Journal hazardous materials, 319-328. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.04.058>
81. Xiao, Peng-fei; Lu; WU, De-dong. (2020) The use of carbon materials in persulfate-based advanced oxidation processes: Review. New Carbon Materials, 667-683. [https://doi.org/10.1016/S1872-5805\(20\)60521-2](https://doi.org/10.1016/S1872-5805(20)60521-2)
82. Xiao, Sa, Xin Yang, (2020) Iron-mediated activation of persulfate and peroxymonosulfate in both homogeneous and heterogeneous ways: Review. Chemical Engineering Journal. 123265.  
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123265>
83. Xu Xi. Qin J., Wei Y., Ye Sh., Shen J., Yao Y., Ding B., Shu Y., He G., Chen H. (2019) Heterogeneous activation of persulfate by NiFe<sub>2</sub>-xCo<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-RGO for oxidative degradation of bisphenol in water. Chemical Engineering Journal. 259-269. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.02.019>
84. Xu Xi., Li Y., Zhang G., Yang F., EL P.(2019) NiO-NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>-rGO magnetic nanomaterials for activated peroxymonosulfate degradation of Rhodamine. Water, 384. <https://doi.org/10.3390/w11020384>
85. Yao Ch., Zhang Y., Du M., Du Xi., Huang. (2019) Insights into the mechanism of non-radical activation of persulfate via activated carbon for the degradation, p-chloroaniline. Chemical Engineering Journal, 262-268  
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.01.040>
86. Yin R., Gou W., Wang H., Du J., Wu Q., Chang Jo., Ren N. (2019) Singlet oxygen-dominated peroxydisulfate activation by sludge-derived biochar for sulfamethoxazole degradation through a nonradical oxidation pathway:

Performance Chemical Engineering Journal, 589-599.  
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.09.184>

87. Yu J., Tang L., Pang Y., Zeng G., Feng H., Zou J., Wang J., Zhu Xu., OUYANG x., Tan J. (2020) Hierarchical porous biochar from shrimp shell for persulfate activation: a two-electron transfer path and key impact factors. Applied Catalysis B: Environmental, 118160.  
<https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2019.118160>
88. Yuan R., Hu L., Yu P., Wang H., Wang Zh., Fang J. (2018) Nanostructured Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> grown on nickel foam: an efficient and readily recyclable 3D catalyst for heterogeneous peroxydisulfate activation, 2204-215.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.01.135>
89. Zhao Sh., Fan Li., Zhou M., Li Xi., (2016) Remediation of copper contaminated kaolin by electrokinetics coupled with permeable reactive barrier. Procedia Environmental Sciences, 274-279.  
<https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.02.036>
90. Zhao Q., Mao Q., Zhou Y., Wei J., Liu X., Yan J., Lou L., Zhang J., Chen h., Tang L.(2017) Metal-free carbon materials-catalyzed sulfate radical-based advanced oxidation processes: review heterogeneous catalysts and applications. Chemosphere, 224-238.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.09.042>
91. Zheng W., Xiao X., Chen B. (2019) nonradical reaction-dominated phenol degradation, peroxydisulfate catalyzed by nitrogen-doped graphene. Science of The Total Environment, 287-296.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.173>
92. Zhou M., Zhu Sh., Yaoyao Yi., Tingting Zh. (2016) electrokinetic/activated alumina permeable reactive barrier-system for the treatment of fluorine-contaminated soil. Clean Technologies and Environmental Policy, 2691-2699.  
<https://doi.org/10.1007/s10098-016-1156-5>
93. Zhou W., Chen Y., Deng Ch., Qi H., Zhang. (2021) Salt crust-assisted thermal decomposition method for direct and simultaneous quantification of

polypropylene microplastics and organic contaminants in high organic matter soils. *Analytica Chimica*, 338801. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2021.338801>

94. Zhou, X., Shi Ph., Qin YF., Fan J.C, Yao WF. (2016) Synthesis of Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/graphene composite catalysts through CTAB-assisted method for Orange II degradation by activation of peroxymonosulfate. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 1020-1030. <https://doi.org/10.1007/s10854-015-3847-9>

95. Zhu Sh., Xiaochenhuang., Ma C., Wang L., Duan X., Shaobin W.(2018) Catalytic removal of aqueous contaminants on N-doped graphitic biochars: inherent roles of adsorption and nonradical mechanisms. 8649-8658. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b01817>

# ANEXOS

## ANEXOS N° 1



### FICHA DE ANÁLISIS DE CONTENIDO

DATOS DEL AUTOR: NOMBRE(S)

PÁGINA(S)

AÑO DE PUBLICACIÓN

LUGAR DE PUBLICACIÓN

TIPO DE INVESTIGACIÓN:

CÓDIGO:

PALABRAS CLAVES: Methods for the activation of persulfates, peroximonosulfato, peroxidisulfato, carbonaceous materials, soil organic pollutants

LOS MATERIALES  
CARBONOSOS

ACTIVACIÓN DE LOS  
PERSULFATOS  
USANDO CARBÓN  
DOPADOS

ACTIVACIÓN DE LOS  
PERSULFATOS  
USANDO CARBÓN  
SOPORTADOS

RESULTADOS:

CONCLUSIONES:

*Elaboración propia*