



Universidad **César Vallejo**

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**Tecnologías Fotocatalíticas para su Aplicación Práctica en la  
Remediación de Efluentes Generados por el Molino de Aceite de  
Palma: Revisión Sistemática**

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
Ingeniera Ambiental

**AUTORAS:**

Fernandez Huaman, Tania (ORCID: 0000-0003-3348-4382)

Muñoz Tejada, Jolek Iris (ORCID: 0000-0002-3879-0103)

**ASESOR:**

Mgtr. Reyna Mandujano, Samuel Carlos (ORCID: 0000-0002-0750-2877)

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:**

Tratamiento y Gestión de los Residuos

LIMA – PERÚ

2022

## **DEDICATORIA**

Dedicamos este trabajo a nuestros queridos padres y familia, así como al futuro incierto de una sociedad negligente con la naturaleza

## **AGRADECIMIENTO**

Agradecemos a Dios por permitirnos realizar ese trabajo, a nuestros docentes quienes contribuyeron en nuestra formación académica y en especial a nuestro asesor de tesis Mgtr. Reyna Mandujano, Samuel Carlos

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARÁTULA .....	i
DEDICATORIA .....	ii
AGRADECIMIENTO.....	iii
ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	v
ÍNDICE DE TABLAS.....	v
INDICE DE FIGURAS.....	vii
ÍNDICE DE GRÁFICOS .....	vii
ÍNDICE DE ABREVIATURAS .....	viii
RESUMEN.....	ix
ABSTRACT .....	x
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 .....	21
3.9. Aspectos éticos .....	21
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	22
V. CONCLUSIONES.....	30
VI. RECOMENDACIONES.....	31
REFERENCIAS.....	32
ANEXOS	

## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Producción mundial de aceites vegetales y superficies cosechadas de diversos cultivos</i>	6
<i>Tabla 2. Características de los efluentes de la planta de aceite de palma tratados</i>	8
<i>Tabla 3. Matriz de categorización apriorística</i>	17
<i>Tabla 4. Rendimiento comparativo de la remoción de diversos fotocatalizadores en los efluentes del molino de aceite de palma</i>	24
<i>Tabla 5. Características de los fotocatalizadores que influyen en el rendimiento fotocatalítico</i>	28

---

## INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Etapas de la palma aceite</i> .....	5
<i>Figura 2. Efluente de molino de aceite de palma con alto contenido de aceite recogido</i> .....	7
<i>Figura 3. Tratamiento fotocatalítico de efluentes de generados por el molino de aceite de palma</i> .....	9
<i>Figura 4. Diagrama esquemático de la degradación fotocatalítica de POME en modo discontinuo</i> .....	10

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<i>Gráfico 1. Procedimiento de Selección de Investigaciones</i>	19
<i>Gráfico 2. Fotocatalizador más aplicado en la remediación de los efluentes generados por el molino de aceite de palma</i>	22

## ÍNDICE DE ABREVIATURAS

ODS	: Objetivos de desarrollo sostenible
POME	: Efluente de la almazara de palma
POM	: Molinos de aceite de palma
POMSE	: Efluente secundario del molino de aceite de palma
CPO	: Aceite de palma crudo
DBO	: Demanda bioquímica de oxígeno
DQO	: Demanda química de oxígeno
MPR	: Reactor fotocatalítico de membrana



## RESUMEN

En el presente estudio se tuvo como objetivo determinar los aspectos más relevantes en la aplicación práctica de las tecnologías fotocatalíticas para la remediación de efluentes generados por el molino de aceite de palma, para lo cual se realizó un estudio sistemático de 70 artículos científicos, los cuales pasaron por un proceso de exclusión quedando añadidos al estudio 25, donde se obtuvo lo siguiente:

El fotocatalizador más aplicado es el  $\text{TiO}_2$  y  $\text{ZnO}$ ; presentando mayor porcentaje de uso con un 39% para ambos, así mismo se encuentran los fotocatalizadores  $\text{CaFe}_2\text{O}_4$  y  $\text{Wo}_3$  con un 11% de uso. Ello es debido a que entre los diversos fotocatalizadores empleados en la fotocatalisis heterogénea, el  $\text{TiO}_2$  es el más prometedor debido a su fuerte actividad fotocatalítica, no toxicidad, alta estabilidad química, bajo costo, alta transparencia a la luz visible. El rendimiento comparativo de la remoción de los fotocatalizadores  $\text{TiO}_2$  y  $\text{ZnO}$  se mostraron conformes con el límite máximo permitido de 50 mg/L de DQO. Además, el promedio del porcentaje de eliminación del DQO usando fotocatalizadores está en rangos de 80 a 100%, de DBO en 60 al 90% y de color 90 al 100%. Las características de los fotocatalizadores se dan por las características fisicoquímicas; como es el caso de la superficie específica (SST), el cual es, una de las características principales para desempeñar un papel decisivo en el rendimiento fotocatalítico de un fotocatalizador; además, se comprobó que la mayoría de los fotocatalizadores de los autores estudiados presentan una SSA muy pequeña, inferior a 30 m<sup>2</sup>/g.

**Palabras clave:** Fotocatalítica, tecnologías, aplicación, remediación, efluentes generados.

## ABSTRACT

The objective of this study was to determine the most relevant aspects in the practical application of photocatalytic technologies for the remediation of effluents generated by the palm oil mill, for which a systematic study of 70 scientific articles was carried out, which underwent a process of exclusion leaving 25 added to the study, where the following was obtained:

The most applied photocatalyst is  $\text{TiO}_2$  and  $\text{ZnO}$ ; presenting the highest percentage of use with 39% for both, as well as the photocatalysts  $\text{CaFe}_2\text{O}_4$  and  $\text{WO}_3$  with 11% of use. This is due to the fact that among the various photocatalysts used in heterogeneous photocatalysis,  $\text{TiO}_2$  is the most promising due to its strong photocatalytic activity, non-toxicity, high chemical stability, low cost, high transparency to visible light. The comparative removal performance of  $\text{TiO}_2$  and  $\text{ZnO}$  photocatalysts were shown to be in compliance with the maximum allowable limit of 50 mg/L COD. In addition, the average percent removal of COD using photocatalysts ranges from 80 to 100%, BOD from 60 to 90% and color from 90 to 100%. The characteristics of the photocatalysts are given by the physicochemical characteristics; as is the case of the specific surface area (SSA), which is one of the main characteristics to play a decisive role in the photocatalytic performance of a photocatalyst; in addition, it was found that most of the photocatalysts of the studied authors present a very small SSA, less than 30  $\text{m}^2/\text{g}$ .

**Keywords:** Photocatalytic, technologies, application, remediation, effluents generate.

# I. INTRODUCCIÓN

El aceite de palma es un producto básico importante que contribuye a los medios de vida de muchas comunidades, al PIB de los gobiernos y al logro de varios objetivos de desarrollo sostenible (ODS), incluidos la erradicación de la pobreza, el hambre cero, el trabajo decente y el crecimiento económico (Mutsaers H., 2019, p.2). Sin embargo, su cultivo y expansión continúa debido a la alta y creciente demanda ha provocado muchos efectos negativos (Vijay Varsha et al., 2016, p.3).

El florecimiento de la industria del aceite de palma se encuentra ensombrecido por el efluente masivo del molino de aceite de palma (POME), el cual se genera a lo largo del proceso de extracción de aceite (Silalertruksa Thapat et al., 2017, p.2).

El efluente de la almazara de palma (POME) es el agua residual generada por las actividades de molienda de aceite de palma (Ding Gong Tao et al., 2016, p.2). Se compone de una alta carga orgánica, lo que da lugar a la alta demanda química de oxígeno (DQO, 15000e100000 ppm) y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO, 10250e43750 ppm), que causará una grave contaminación ambiental si no se maneja adecuadamente (Bakar Siti Nur H. et al., 2018, p.2).

El efluente del molino de aceite de palma (POME) generado a partir de los procesos de molienda del aceite de palma para producir aceite de palma crudo (CPO) es el efluente agroindustrial más contaminante (Law M. C. et al., 2016, p.3). Se estima que se produjeron de 0,5 a 0,75 toneladas de pepita cruda por cada tonelada de racimos de fruta fresca (RFF) procesados. El POME al no ser tratado adecuadamente produce una destrucción desastrosa al medio ambiente al contaminar los recursos hídricos (Cheng Yoke Wang et al., 2017, p.3).

Entre 1974 y 2007, la producción mundial de aceite de palma crudo aumentó de menos de 3 millones de toneladas a casi 40 millones de toneladas, lo que representa una tasa de crecimiento anual promedio de más del 8% (Hansen Sune B. et al., 2016, p.2). Siguiendo esta tendencia, la superficie de palma aceitera cultivada en todo el mundo también aumentó de 3,6 millones de ha en 1961 a 21,4 millones de ha en 2017 (Nambiappan Balu et al., 2018, p.2).

Además, es probable que la creciente demanda mundial de aceite de palma impulse una mayor expansión de este producto estratégico en los países productores con

consecuencias para el medio ambiente y el bienestar humano (Gamaraalala D., Sawai O. y Nunoura T., 2019, p.2).

Por tal motivo, existen fuertes impulsos que exigen una nueva alternativa que pueda tratar eficazmente los residuos de POME, o incluso mejor convertirlos en recursos energéticos renovables a lo largo del proceso de tratamiento (Nqombolo Azile et al., 2018, p.2).

Ante ello, la tecnología fotocatalítica ofrece una opción de postratamiento alternativa atractiva y sostenible para la remediación de TPOME (Chowdhury Pankaj et al., 2017, p.3).

Las tecnologías fotocatalíticas son eficientes para la remediación de efluentes generados por el molino de aceite de palma, en tal sentido se plantea el siguiente problema general: ¿Cuáles son los aspectos más relevantes en la aplicación práctica de las tecnologías fotocatalíticas para la remediación de efluentes generados por el molino de aceite de palma? y como problemas específicos se propuso:

**PE1:** ¿Cuál es el fotocatalizador más aplicado en la remediación de los efluentes generados por el molino de aceite de palma?

**PE2:** ¿Cuál es el rendimiento comparativo de la remoción de diversos fotocatalizadores aplicados en los efluentes generados por el molino de aceite de palma?

**PE3:** ¿Cuáles son las características de los fotocatalizadores que influyen en el rendimiento fotocatalítico a la remediación de efluentes generados por el molino de aceite de palma?

Y como objetivo general se propuso: Determinar los aspectos más relevantes en la aplicación práctica de las tecnologías fotocatalíticas para la remediación de efluentes generados por el molino de aceite de palma; y los objetivos específicos son:

**OE1:** Analizar el fotocatalizador más aplicado en la remediación de los efluentes generados por el molino de aceite de palma

**OE2:** Identificar el rendimiento comparativo de la remoción de diversos fotocatalizadores aplicados en los efluentes generados por el molino de aceite de palma

**OE3:** Describir las características de los fotocatalizadores que influyen en el rendimiento fotocatalítico a la remediación de efluentes generados por el molino de aceite de palma

Debido a que se realizará una revisión a nivel nacional e internacional de los problemas existentes acerca de los aceites de palma, para buscar reducirlos mediante las tecnologías fotocatalíticas, este estudio presenta una justificación teórica, así mismo, el fin es brindar un aporte literario actualizado con información reciente que ayude y sirva de base a futuros investigadores.

## II. MARCO TEÓRICO

El aceite de palma es un producto valioso que se utiliza en todo el mundo en una gran cantidad de productos de uso diario; motor de desarrollo en el sudeste asiático y en otros lugares (Permpool N., Bonnet S. y Gheewala S., 2016, p.1).

Los pequeños agricultores aportan cerca del 50% del aceite de palma que se comercializa en todo el mundo (Austin K. et al., 2017, p.2). Según el Consejo de Aceite de Palma de Malasia (MPOC, 2016), la industria de la palma en Malasia representa actualmente el 39% de la producción y el 44% de las exportaciones de aceite de palma en el mundo (Gérard Anne et al., 2017, p.2).

En Indonesia especialmente, la superficie plantada con palma aceitera ha crecido espectacularmente en las últimas dos décadas, de 4 millones de hectáreas en 2000 a casi 12 millones en la actualidad, superando así a Malasia como el mayor productor mundial de aceite de palma (Pye Oliver., 2019, p.1).

India, el mayor importador mundial de aceite de palma, también tiene la intención de lograr un gran aumento en su industria de aceite de palma, pero, con solo 300,000 hectáreas de área plantada (División de Semillas de Aceite, 2016), por el momento, sigue siendo un actor pequeño (Tyson A., Varkkey H. y Choiruzzad D., 2017, p.1).

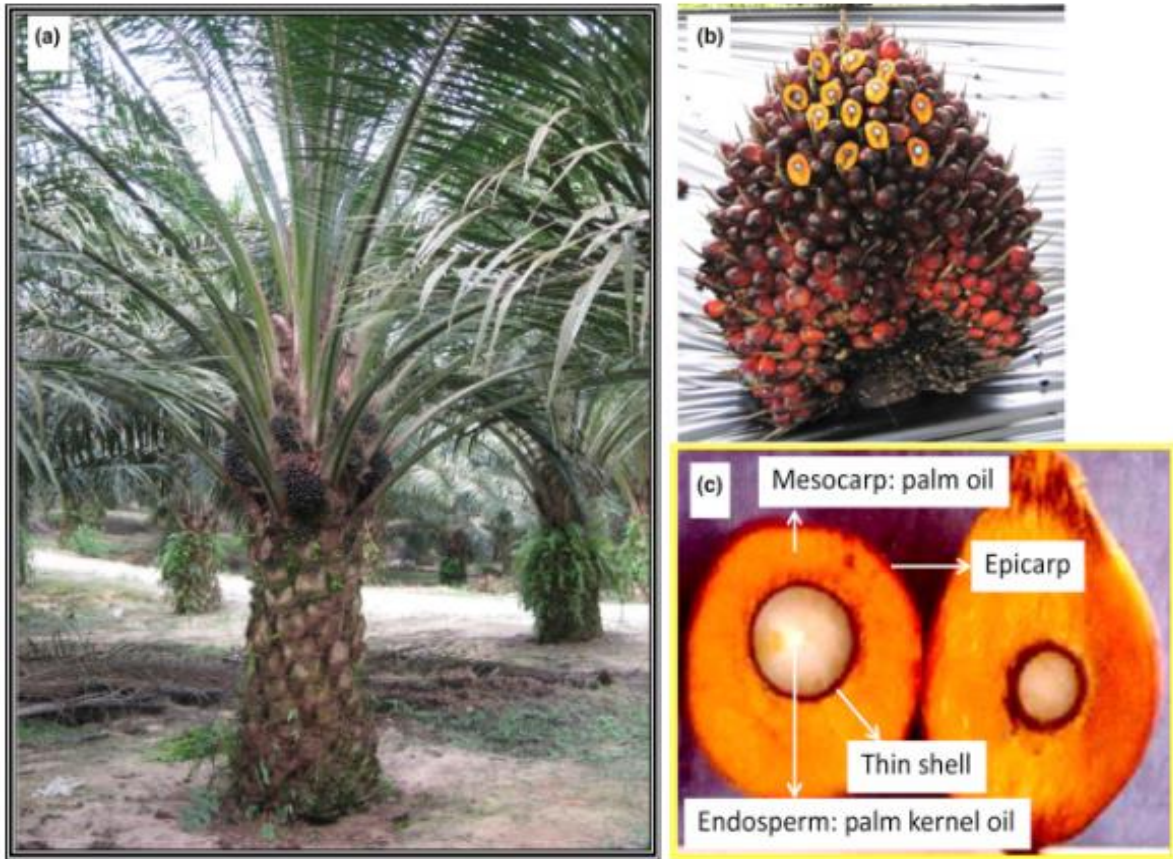
El aceite de palma es también el aceite vegetal más comercializado a nivel mundial y representa casi el 60% de las exportaciones mundiales de semillas oleaginosas y se prevé que la demanda aumente sustancialmente en el futuro (Foong Steve Z. et al., 2019, p.2). A medida que crece el comercio de aceite de palma debido a la creciente demanda mundial, también ha habido un rápido aumento en la cantidad de aceite producido y el área total cultivada en las regiones donde se cultivan las palmas de aceite (Euler Michael et al., 2016, p.3).

La palma de aceite, *Elaeis guineensis* Jacq., Es un cultivo tropical perenne que se cultiva principalmente por su aceite vegetal, que se compone tanto de aceite de palma como de aceite de semilla (Saswattecha L. et al., 2016, p.2). El aceite de palma se deriva del mesocarpio, mientras que el aceite de semilla se deriva del endospermo o semilla (Godswill N. et al., 2016, p.228). (Ver Figura 1).

Igualmente, ambos aceites vegetales de palma aceitera son componentes de muchos alimentos, productos oleoquímicos, medicinales y de salud, productos para el hogar

y productos industriales siendo aproximadamente el 16% del aceite de palma mundial convertido en biodiesel (Isa Mohamed H. et al., 2020, p.1).

**Figura N°1: Etapas de la palma aceite**



*Fuente: Godswill N. et al., (2016)*

En la figura 1 se muestra (a) Palma aceitera joven madura con racimos de frutos. (b) Racimo maduro. (c) Corte transversal de fruta madura que muestra dos fuentes de aceite vegetal, es decir, aceite de palma del mesocarpio y aceite de palmiste del endospermo o almendra.

Los países con una industria de palma aceitera exitosa son, por ejemplo, Indonesia, Malasia, Tailandia, Colombia y Papua Nueva Guinea, quienes tienen al menos el 30% de sus tierras de palma aceitera desarrolladas para cultivos industriales a gran escala y se integran con esquemas de pequeños agricultores (Aubert P., Chakib A. y Laurans Y., 2017, p.2).

Así mismo, la palma aceitera prospera en los trópicos húmedos y se cosechó en aproximadamente 15,7 millones de hectáreas en 2013 – 14. (Ver tabla 1).

**Tabla N°1: Producción mundial de aceites vegetales y superficies cosechadas de diversos cultivos**

<b>Cultivo de aceite</b>	<b>Producción (millones de toneladas)</b>	<b>% de la producción mundial</b>	<b>Superficie total cosechada (millones de ha)</b>	<b>% del área cosechada mundial</b>
<b>Aceite de palma</b>	58,5	29,8	15,7	5,8
<b>Haba de soja</b>	43,8	22,3	114,2	42,3
<b>Colza</b>	25,7	13,1	35,7	13,2
<b>Girasol</b>	15,8	8,0	25,9	9,6
<b>Mundo</b>	196,4	100	270,2	100

*Fuente: Goh K. et al., (2017)*

Pero, aunque la industria del aceite de palma aparece como una de la agroindustria más estructuradas del proceso de molienda puede generar aguas residuales coloidales masivas, a menudo conocidas como efluentes de la almazara de palma (POME) (Santika Truly et al., 2021, p.1).

Así mismo, el cultivo ha adquirido una mala reputación debido a los bosques que han sido y siguen siendo talados para nuevas plantaciones (Mutsaers H., 2019, p.3). Así como su crecimiento ha llevado a un consumo masivo de agua y a una alta generación de efluentes de molinos de aceite de palma altamente contaminantes (POME) (Córdoba Diana et al., 2019, p.4).

El POME es un agua residual altamente contaminante con propiedades típicas: demanda bioquímica de oxígeno (DBO) de 25.000 miligramos por litro, demanda química de oxígeno (DQO) de 50.000 miligramos por litro, aceite y grasa de 8.000 miligramos por litro, sólidos en suspensión de 20.000 miligramos por litro y sólidos totales de 40.000 miligramos por litro (Dislich Claudia et al., 2017, p.3). Por lo tanto, POME también contiene una cantidad significativa de aceite y debe tratarse previamente antes de descargarlo al medio ambiente (Abram Nicola K. et al., 2017, p.3).

Esto se debe a que el proceso de molienda tradicional emplea vapor para el proceso de esterilización y lamentablemente, este proceso es un precursor de la formación de residuos POME que son menos respetuosos con el medio ambiente (Law et al.,

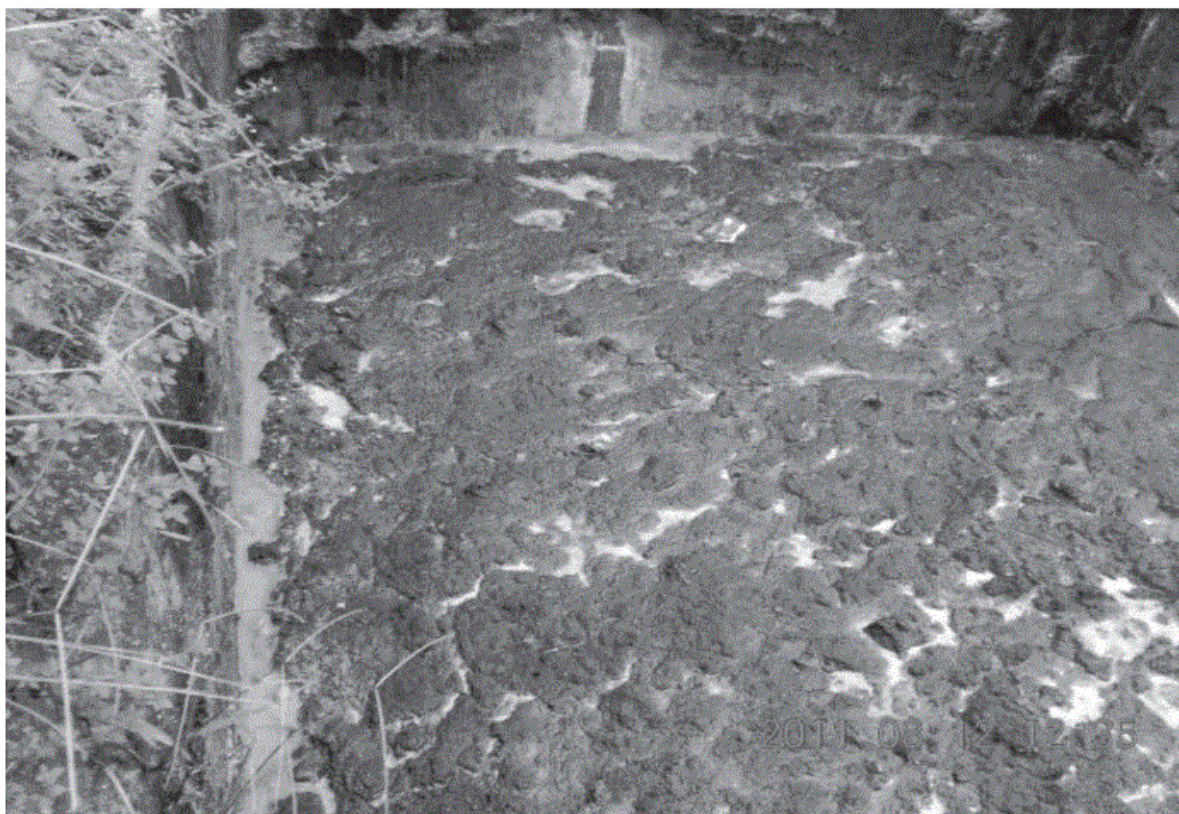


2016). A partir de un estudio se descubrió que el procesamiento de cada tonelada de aceite de palma crudo produciría aproximadamente 2,5 y 3,75 toneladas de POME.

Las deficiencias del sistema de encharcamiento adoptado por la mayoría de los molinos de aceite de palma (POM) para el tratamiento de POME para aliviar las preocupaciones ambientales y de salud pública son bastante alarmantes (Busch Jonah et al., 2016, p.5).

Se encontró que la esterilización con FFBS, la extracción y clarificación de CPO y la separación del grano y la cáscara de las mezclas agrietadas en el hidrociclón fueron los procesos que generaron la mayor cantidad de POMA al 36%, 60% y 4%, respectivamente (Gamaralala D., Sawai O. y Nunoura T., 2019, p.2). Un rápido aumento en el número de POM de 355 a 426 molinos, exacerbó aún más este problema (Ver figura 2).

**Figura N°2:** *Efluente de molino de aceite de palma con alto contenido de aceite recogido*



*Extraído de: Sani Sadiq et al., (2020)*

Como parte de los contaminantes orgánicos del POME, los residuos fibrosos residuales del proceso de extracción de aceite no sólo han aumentado la turbiedad

de las aguas residuales, sino también la dificultad para tratarlas (Tabassum Salma et al., 2016, p.2). Además, un olor desagradable también aparecería durante el tratamiento de estanqueidad de las POME (Iskandar Muhammad J. et al., 2018, p.2).

Esto genera que los vecinos residenciales a menudo se molesten por el vertido de POME, principalmente debido a el aspecto parduzco y sus propiedades olorosas (Yashni G. et al., 2021, p.3). Con el sistema de tratamiento de estanque abierto existente, la mayoría de las moledoras de los principales países elaboradores de aceite de palma no cumplen con el estricto umbral de descarga establecido por el Departamento de Medio Ambiente (Chen Yoke W. et al., 2021, p.1).

Donde, las industrias de aceite de palma suelen emplear sistemas de estanques abiertos o métodos tradicionales de tratamiento biológico (aeróbico y digestión anaeróbica) para el tratamiento de POME (Bello M. et al., 2017, p.2). Aunque estos procesos pueden reducir en cierta medida la concentración de OPI la calidad del efluente final no suele cumplir con los niveles de descarga reglamentarios. Siendo mostradas las características típicas de POME en la Tabla 2.

**Tabla N°2:** Características de los efluentes de la planta de aceite de palma tratados

Parámetros	Unidades	Valores	Límite de descarga estándar
Temperatura	°C	26-38	-
pH	-	7.6-8.4	5-9
Demanda biológica de oxígeno	Mg/L	250-580	50
Demanda química de oxígeno	Mg/L	150-2800	100
Carbono orgánico total	Mg/L	77.09-301	-
Sólidos en suspensión	Mg/L	100-150	400
Sólidos totales	Mg/L	815-2,430	-
Nitrógeno total	Mg/L	6-13	150
Fenol	Mg/L	10.7	0.1
Catecol	Mg/L	4.3	-
3-metilcatecol	Mg/L	14.9	-
Ácido 4-hidroxibenzoico	Mg/L	4.1	-
Ácido cafeico	Mg/L	43.2	-
Ácido ferúlico	Mg/L	34.8	-
Compuestos fenólicos	Mg/L	30-630	0.1-0.5
Color	ADMI	Por encima de 500	200
Aceite y grasa	Mg/L	5.2	100

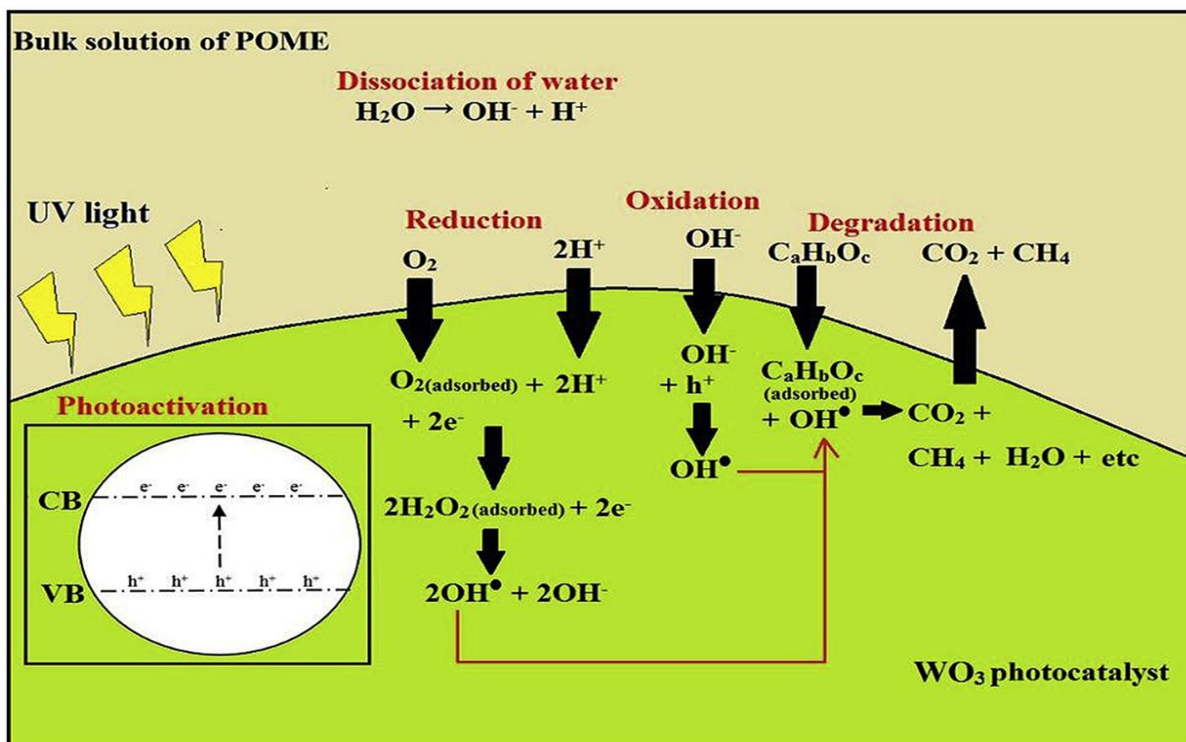
*Fuente: Alhaji et al., (2017)*

Varios métodos de tratamiento convencionales, como la digestión aeróbica y anaeróbica, la coagulación, la filtración por membrana y la adsorción han sido investigados para el tratamiento de POME (Wong Lai Peng et al., 2018, p.2). Sin embargo, estos métodos no consiguen reducir los niveles de contaminantes en el POME hasta los límites permitidos (Jusoh Norela et al., 2020, p.1).

Los altos niveles de DQO residual, los compuestos fenólicos, el color marrón oscuro antiestético y el aceite residual son las principales preocupaciones ya que muchas industrias descargan TPOME con la concentración de estos parámetros por encima de la norma límite de vertido (Jiang Zhuoying et al., 2020, p.4).

Con la esperanza de proteger la salud humana y el medio ambiente, minimizar la contaminación del agua y para cumplir con los límites reglamentarios estándar, tecnologías más eficientes y potentes para la remediación de TPOME se realizan como es el caso de las tecnologías fotocatalíticas (Jarujareet Palist et al., 2019, p.3). (Ver figura 3).

**Figura N°3:** Tratamiento fotocatalítico de efluentes de generados por el molino de aceite de palma

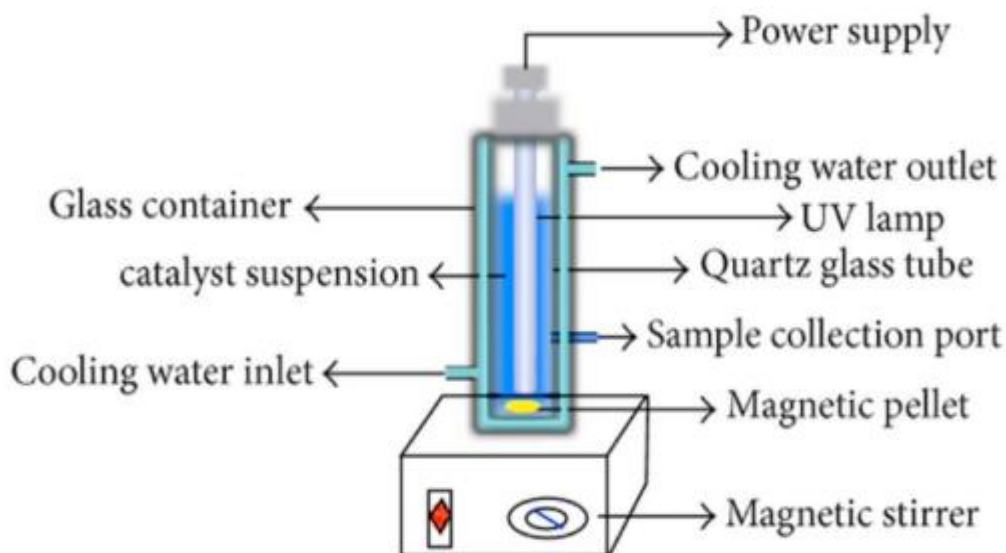


Fuente: Cheng Yoke Wang et al., (2017)

La fotocatalisis que utiliza un material de óxido semiconductor es una técnica ampliamente establecida, que se aplica para la eliminación de una variedad de contaminantes orgánicos (Bakar Siti Nur H. et al., 2018, p.3). Bajo irradiación de luz, se genera un par electrón-hueco a partir del material debido a la transferencia de electrones desde la banda de valencia a la banda de conducción. Varias especies reactivas se forman mediante la reacción de pares de electrones y huecos con agua y oxígeno (Rayaroth M., Escobedo E. y Chang Y., 2019, p.3)

Así mismo, la investigación a escala de laboratorio, principalmente en el contexto del funcionamiento por lotes es la más usada, como se ilustra en la figura 4.

**Figura N°4:** Diagrama esquemático de la degradación fotocatalítica de POME en modo discontinuo



*Fuente: Ng Kim Hoong, et al., (2017)*

Del mismo modo, el tratamiento fotocatalítico implica dos componentes indispensables, a saber, el activador de la luz ("foto") y el catalizador, para la degradación de los contaminantes orgánicos en el POME (Ng Kim Hoong, et al., 2017, p.4).

Es así que, los estudios sugieren un gran potencial de la fotocatalisis para reemplazar algunos de los conocidos procesos de separación y degradación en la etapa de tratamiento avanzado de los TPOME (Alhaji et al., 2018, p.1 y Aris et al., 2019, p.2).

Siendo empleado varios fotocatalizadores para reducir los niveles de OPI en el TPOME; siendo entre los fotocatalizadores, TiO<sub>2</sub>, ZnO, WO<sub>3</sub>, y CaFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> los fotocatalizadores más frecuentemente investigados para la remediación de TPOME (Qian Ruifeng et al., 2019, p.2). Pero, la diferencia en el rendimiento de los distintos fotocatalizadores para la eliminación de la DQO puede atribuirse a la diferencia en la concentración inicial de la DQO en el TPOME más que a las propiedades intrínsecas de los fotocatalizadores (NG Kim H., 2021, p.3).

Por otro lado, el TiO<sub>2</sub> es casi un fotocatalizador ideal para la remediación de TPOME debido a su rentabilidad, alta estabilidad química y sus agujeros foto-generados altamente oxidantes además de su mayor eficiencia de remediación en comparación con los otros fotocatalizadores (Gamaralalage D. et al., 2020, p.2). El ZnO también es promocionado como uno de los mejores fotocatalizadores para la remediación de TPOME debido a su alta eficiencia y versatilidad en la degradación de contaminantes orgánicos (Muñoz Chilito J. y Rodríguez Páez J., 2021, p.5).

Además, de acuerdo a los estudios revisados se exponen los siguientes antecedentes:

**Haji Alhaji M. et al., (2017)**, tuvo como objetivo la degradación de DQO, DBO y Color presentes en el efluente de la almazara de aceite de palma (POME) utilizando el sistema UV / TiO<sub>2</sub>. Donde, se ha ejecutado una herramienta estadística llamada diseño compuesto central centrado en la cara a través de la metodología de superficie de respuesta mediante el uso de software experto en diseño para modelar y optimizar el proceso de fotodegradación. Los resultados de FTIR muestran un valor pico de 1.406,50 y 1.452,50 cm<sup>-1</sup>, lo que indica que se forma la anatasa de TiO<sub>2</sub> mientras que no aparece el pico a 2.900 cm<sup>-1</sup> indica que todos los compuestos orgánicos se han eliminado después de la calcinación. Además, las condiciones óptimas para los tres parámetros son 5,50 para el pH inicial, 4,84 mg para la dosis de catalizador y 42,86 min para el tiempo, y el porcentaje de eliminación de DQO, DBO y color está dentro del rango de 59,43 a 96,81%, 48,05 a 102,68% y 60,63–94,29% respectivamente.

**Alhaji M. et al., (2017)**, se centra en los diversos tipos de soportes utilizados para la inmovilización del catalizador de nanomateriales de dióxido de titanio para la degradación de contaminantes orgánicos en las aguas residuales. Donde, se explican



varios soportes adecuados a la técnica de inmovilización particular utilizada para la degradación de contaminantes en corrientes de aguas residuales. En general, un recubrimiento de catalizador sobre soportes se lleva a cabo por vía física (p. Ej., Tratamiento térmico) o química (p. Ej., Sol-gel). Entre una gama de soportes utilizados, algunos de los más destacados incluyen vidrio, sílice, carbón activado, acero inoxidable, celulosa, arcilla. Concluyendo que, los métodos de caracterización en uso, como la difracción de rayos X, el microscopio electrónico de transmisión, el microscopio electrónico de barrido y la espectroscopia UV.

**Ng Kim Hoong et al., (2017)**, en este estudio se ha empleado un método fotocatalítico para restaurar el efluente líquido de un molino de aceite de palma en Malasia. Específicamente, se comparó el rendimiento de  $\text{TiO}_2$  y  $\text{ZnO}$  para el pulido fotocatalítico de efluentes de molinos de aceite de palma (POME). Donde, el fotocatalizador de  $\text{ZnO}$  tiene forma irregular, mayor tamaño de partícula, pero menor área de superficie específica BET ( $9,71 \text{ m}^2 / \text{g}$ ) en comparación con los fotocatalizadores esféricos de  $\text{TiO}_2$  ( $11,34 \text{ m}^2 / \text{g}$ ). Por otro lado, el  $\text{ZnO}$  perdió alrededor del 30% de su actividad después del primer ciclo de fotorreacción. Concluyendo que, el estudio de longevidad también mostró que el  $\text{TiO}_2$  fue un mejor fotocatalizador en comparación con el  $\text{ZnO}$  (74,12%), con más del 80,0% de eliminación orgánica después de 22 h de irradiación UV.

**Sidik Dilaeleyana S. et al., (2020)**, se intentó sintetizar nanopartículas de  $\text{ZnO}$  mediante precipitación utilizando diferentes proporciones de solución de  $\text{ZnO}$  a extracto de hoja de *Cymbopogon citratus* (3: 1, 5: 1 y 9: 1). Donde, el  $\text{ZnO}$  modificado se caracterizó utilizando espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier, microscopía electrónica de transmisión y difracción de rayos X. Dando como resultado que, el rendimiento de  $\text{ZnO-CC}$  3: 1 en términos de color (99,84%), DQO (98,97%), DBO (96,24%) y eliminación de turbidez (99,89%) del POMSE tratado fue significativo y la mejora de la eficiencia del rendimiento para el tratamiento POMSE utilizando MPR se correlaciona con la reducción en el tamaño de  $\text{ZnO-CC}$  3: 1 (6,6–42,9 nm) que promueve una mayor actividad de degradación y minimiza la disminución del flujo de membrana durante el proceso. Concluyendo que, el sistema MPR acoplado tiene un potencial significativo para su aplicación en la industria de tratamiento de efluentes de plantas de aceite de palma, ya que mitiga el ensuciamiento de la membrana y produce efluentes tratados de buena calidad.

**Zainuri Nur et al., (2018)**, este estudio informa sobre el tratamiento POMSE mediante el proceso de fotocatalisis en presencia de nanopartículas de ZnO-polietilenglicol (ZnO-PEG). Los resultados de la caracterización mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier, difracción de rayos X y microscopía electrónica de transmisión muestran que no hay impurezas presentes en las muestras y presentan la naturaleza y enlaces químicos del ZnO-PEG además de tener menor aglomeración y menor tamaño promedio (25 –150 nm) en comparación con el ZnO comercial (25–200 nm). Las nanopartículas de ZnO-PEG tienen un gran potencial en la degradación de POMSE y esto se apoya en los resultados obtenidos de los trabajos experimentales. Además, se encuentra que todos los factores principales fueron significativos, con contribuciones de (A) 66%, (B) 73%, (C) 84% y (D) 84% respectivamente, a la degradación de POMSE.

**Lam Sze Mun et al., (2018)**, se fabricaron micro / nanoestructuras de ZnO en forma de flor mediante un método de reflujo simple y sin tensioactivos. Donde los hallazgos de difracción de rayos X mostraron que el producto de ZnO preparado era altamente cristalino con estructura de wurtzita hexagonal. Se midió que la energía de banda prohibida de la muestra de ZnO era 3,18 eV mediante un espectro de reflectancia óptica. Las características morfológicas similares a flores de las micro / nanoestructuras de ZnO se observaron mediante microscopía electrónica de barrido por emisión de campo. Concluyendo que, dichas micro / nanopartículas podrían usarse en la fotodegradación de efluentes de molienda de aceite de palma pretratados (POME) bajo irradiación UV.

**Affam A. et al., (2020)**, Este estudio determinó la eficacia del método de tratamiento fotocatalítico utilizando peróxido de hidrógeno, óxido de zinc y luz ultravioleta. Se investigaron una variedad de condiciones operativas tales como el efecto del pH, la dosis de peróxido de hidrógeno, la cantidad de óxido de zinc, la irradiación con luz ultravioleta y el tiempo de contacto para determinar la condición óptima para el método de tratamiento. También se llevó a cabo la cinética de degradación. Para el proceso de tratamiento UV / H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, en condiciones óptimas, Se encontró que la DQO y la eficiencia de eliminación de color más altas fueron 41,9% y 38,3%, respectivamente. Para el proceso de tratamiento con UV / ZnO, en condiciones óptimas, la DQO y la eficiencia de eliminación de color más altas fueron 37% y 85%, respectivamente.

**Ghazali Siti et al., (2019)**, este estudio se realizó para sintetizar y caracterizar el fotocatalizador derivado de los desechos de las cáscaras de berberecho y utilizando lantano (La) como dopante. Además de eso, se evaluó el rendimiento del 3% en peso de óxido de calcio dopado con La (3LaCa) como fotocatalizador en la degradación de POME con diferentes velocidades de agitación de las eficiencias de eliminación de DQO bajo irradiación UVC de 240 minutos en un sistema discontinuo. Los resultados revelaron que 3LaCa tiene el potencial de ser utilizado como un fotocatalizador alternativo además del óxido de titanio (TiO<sub>2</sub>). Se demostró que 300 rpm es la velocidad de agitación óptima con actividad fotocatalítica de eliminación al 54,0%. Concluyendo que, los estudios cinéticos han demostrado que la degradación fotocatalítica de POME sigue una cinética de primer orden de reacción con un coeficiente de correlación de 0,97 y velocidades de reacción específicas de  $3,6 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ .

**Zangeneh Hadis et al., (2019)**, el objetivo del estudio actual es sintetizar nuevos fotocatalizadores impulsados visibles (L-Histidina (C, N) codoped-TiO<sub>2</sub>-CdS) con diferentes cargas de L-Hisitdina (1, 2 y 3% en peso) y CdS (1 Relaciones de masa: 9, 7: 1 y 1: 5 de CdS a TiO<sub>2</sub>). Luego, se estudió su aplicación para la fotodegradación de naranja de metilo (MO) y efluentes de molinos de aceite de palma tratados biológicamente (POME). Donde. Los resultados de DRS indicaron que todas las muestras modificadas con diferentes cargas de L-hisitdina y CdS mostraron un desplazamiento rojo a la región visible. Los resultados de los experimentos de fotodegradación mostraron que la L-hisitdina con una fracción en peso del 2% y una proporción de masa de TiO<sub>2</sub> a CdS de 7: 1 fueron la cantidad óptima de modificadores en la red de fotocatalizadores. La intensidad de PL del fotocatalizador disminuyó con la adición de nanopartículas de L-hisitdina y CdS debido a una disminución en e<sup>-</sup> / h<sup>+</sup> +recombinación. Concluyendo que, la degradación completa de la pepita tratada biológicamente se logró a pH original, concentración de demanda química de oxígeno (DQO) de 300 mg / L, carga de catalizador de 2 g / L y tiempo de irradiación de 2 h.

Razali N. et al., (2021), en este estudio, la pepita se degradó con éxito utilizando nitruro de carbono gráfico (gC<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) fotocatalizador sintetizado por calcinación. El fotocatalizador preparado se caracterizó por espectroscopía de reflectancia difusa ultravioleta visible (UV-Vis DRS) y microscopía electrónica de barrido (SEM). Los resultados de SEM revelaron la morfología del fotocatalizador gC<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. gC<sub>3</sub>N<sub>4</sub> podría actuar como un fotocatalizador impulsado por luz visible (VLD) con la mayor



eficiencia fotocatalítica del 71% bajo luz visible. El presente trabajo destaca el potencial de gC 3 N 4 hacia la degradación de POME en condiciones de luz y oscuridad visibles. Concluyendo que, el fotocatalizador gC 3 N 4 puede considerarse un candidato ideal para el tratamiento de la POME.

### **III. METODOLOGÍA**

#### **3.1 Tipo de investigación**

Toda investigación espera aclarar, incrementar los conocimientos o apoyar teorías sobre el fenómeno a estudiar, por ello, es necesario definir el tipo de investigación y sus bases en las que se desarrollaran, la metodología que se usara. El presente estudio está dirigido como una investigación aplicada, Lozada (2014): este tipo de investigación se aplica para problemáticas que se encuentran en el día a día o dentro de nuestra realidad, generando conocimientos como respuestas directas a estas problemáticas específicas a resolver como en este caso las tecnologías fotocatalíticas para su aplicación práctica en la remediación de efluentes generados por el molino de aceite de palma.

El diseño aplicado es narrativo tópico, Mertens (2005) nos dice que en el diseño narrativo encontramos tres tipos, estos son: tópicos, biográficos y autobiográficos. El diseño narrativo tópico se encarga de estudiar fenómenos o sucesos. En este diseño se va a recolectar datos y experiencias vividas de aquellos sujetos que tuvieron relación con el fenómeno a investigar, además que se registran los acontecimientos tal como los vivieron quienes lo experimentaron y lo narran.

#### **3.2 Categoría, subcategoría y matriz de categorización**

Para esta investigación se usó la matriz apriorística el cual se determina por categorías y sub categorías planteadas de acuerdo a nuestros objetivos específicos ver Tabla N°3.

**Tabla N°3: Matriz de categorización apriorística**

<b>PROBLEMAS ESPECÍFICOS</b>	<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b>	<b>CATEGORÍAS</b>	<b>SUB CATEGORÍAS</b>	<b>CRITERIO 1</b>	<b>CRITERIO 2</b>
¿Cuáles es el fotocatalizador más aplicado en la remediación de los efluentes generados por el molino de aceite de palma?	Analizar el fotocatalizador más aplicado en la remediación de los efluentes generados por el molino de aceite de palma.	Fotocatalizador mas aplicado en la remediación Jarujareet Palist et al., (2019, p.3)	TiO2 ZnO WO3  Yashni G. et al., (2021, p.3).	De acuerdo a la cantidad de veces concentración del catalizador	De acuerdo a los estudios científicos
¿Cuál es el rendimiento comparativo de la remoción de diversos fotocatalizadores aplicados en los efluentes generados por el molino de aceite de palma?	Identificar el rendimiento comparativo de la remoción de diversos fotocatalizadores aplicados en los efluentes generados por el molino de aceite de palma.	Rendimiento comparativo de la remoción NG Kim H., (2021, p.3)	Contaminante objetivo Porcentaje de remoción Busch Jonah et al., (2016, p.5).	De acuerdo al tiempo empleado	De acuerdo al fotocatalizador
¿Cuáles son las características de los fotocatalizadores que influyen en el rendimiento fotocatalítico a la remediación de efluentes generados por el molino de aceite de palma?	Evaluar las características de los fotocatalizadores que influyen en el rendimiento fotocatalítico a la remediación de efluentes generados por el molino de aceite de palma.	Fotocatalizadores que influyen en el rendimiento fotocatalítico Alhaji et al., (2019, p.3)	Área superficial específica Tamaño de las partículas (NG Kim H., 2021, p.3).	De acuerdo al rendimiento fotocatalítico	De acuerdo a la eficiencia de remoción del DQO

Fuente: Elaboración propia

### **3.3 Escenario de estudio**

Esta investigación engloba una serie de información, específicamente usadas artículos científicos. Al ser esta una revisión sistemática el escenario pasa de ser la realidad presente a cada realidad o espacio donde se desarrollaron los hechos o sucesos de cada información que ha sido usada para el desarrollo de esta investigación, es decir los laboratorios o campos de prueba que se puedan encontrar en los artículos científicos usado son escenario de estudio de este trabajo de investigación.

### **3.4 Participantes**

Las fuentes usadas para el desarrollo de esta investigación son: Scielo, Sciencedirect y Scopus estas son las participantes del presente trabajo, a través de ellas se pudo recolectar información para el desarrollo del trabajo de investigación.

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

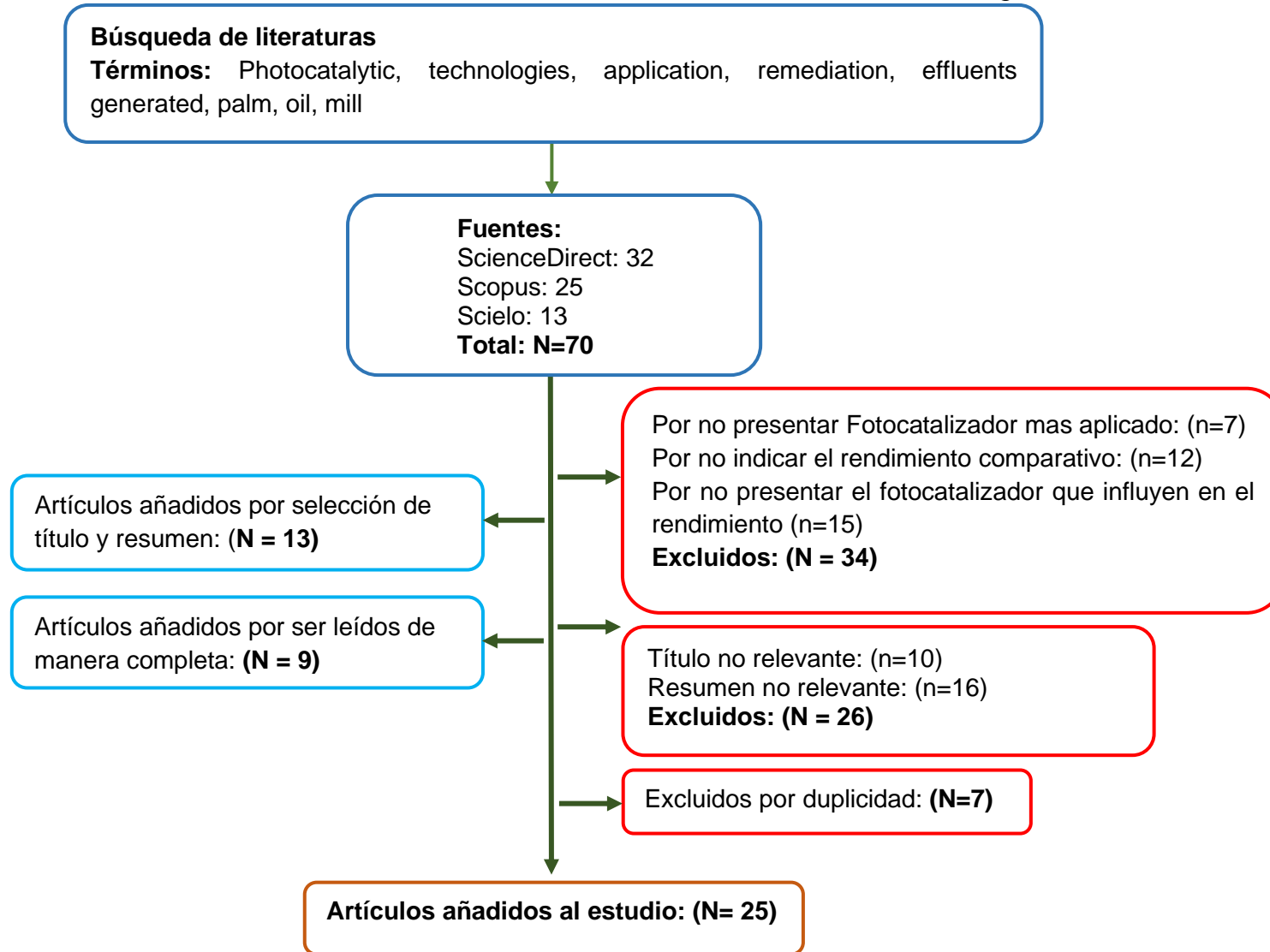
Para el tipo de investigación aplicada en este trabajo de investigación hemos usado la técnica de análisis documental, esta técnica es un proceso por el cual extraemos información que nos genere un nuevo documento permitiéndonos llegar a la información adecuada a través de este nuevo documento que mantendrá o reunirá toda información que se a analizado de otros trabajos o documentos, teniendo así nociones y sintetizando todo lo estudiado en un nuevo documento (María Rubio, S/F)

El instrumento usado para la recolección de datos fue la ficha de análisis de contenido, el análisis documental se pudo concretar a través de la aplicación de este instrumento dentro de la investigación para lograr obtener los resultados.

### **3.6 Procedimientos**

El procedimiento mostrado en el siguiente gráfico, detalla cómo se llegó a seleccionar los artículos usados para esta investigación:

**Gráfico N° 1: Procedimiento de Selección de Investigaciones**



### 3.7 Rigor científico

No existe una técnica específica que evalúe la veracidad de un trabajo de investigación, pero el rigor científico emplea criterios que permiten evaluar y determinar si un trabajo de investigación cumple con la veracidad de su contenido. Noreña *et al.* (2012) el rigor científico hace que la información encontrada tenga confianza con respecto a lo investigado y exployado dentro del trabajo investigado, los criterios usados son:

Criterio de la credibilidad, este deja evidenciar a los hechos o sucesos que vivieron los participantes o sujetos tal y como sucedió, plasmando el investigador sus vivencias como los narran y como lo percibió el sujeto evitando ser tergiversado por el investigador. De esta forma el fenómeno estudiado debe ser alcanzado por los resultados siendo este lo más próximo posible.

Criterio de la transferibilidad, la posibilidad o la facilidad de poder mover o transferir los resultados de una investigación a otros contextos de la problemática, para ello se debe tener un análisis excepcional para conocer mejor las características del contexto. A través de esta descripción se podrá comparar dichos estudios con otro o en todo caso conocer lo común que podrían tener los estudios a comparar.

Criterio de la dependencia, la estabilidad de los datos se va ver dentro de este criterio, ya que se espera que los investigadores lleguen a concluir datos coherentes, si bien los datos cada uno en sus diferentes contextos varían; los investigadores tratan de generar una estabilidad a través de su información que nos arrojen resultados congruentes.

Criterio de Confirmabilidad, nos indica que al seguir otras investigaciones o informaciones se pueda llegar a los mismos resultados, es decir podamos coger una información distinta a la que está en estado de investigación y se llegue a los mismos resultados, para ello debe tener detallada la metodología.

### 3.8 Método de análisis de información

En la presente investigación se usó el método de triangulación; es así que mediante el uso de esta técnica se estudió los problemas planteados; también se usó en método de matriz apriorística, mediante este método se dividió en categorías y sub categorías, como se presenta a continuación.

Categorías:

- ✓ Rendimiento comparativo de la remoción
- ✓ Fotocatalizadores que influyen en el rendimiento fotocatalítico
- ✓ Fotocatalizador mas aplicado en la remediación

N°	Categorías	Sub categorías
1	Fotocatalizador mas aplicado en la remediación	a) TiO <sub>2</sub> b) ZnO c) WO <sub>3</sub>
2	Rendimiento comparativo de la remoción	a) Contaminante objetivo b) Porcentaje de remoción
3	Fotocatalizadores que influyen en el rendimiento fotocatalítico	c) Área superficial específica d) Tamaño de las partículas

### 3.9 Aspectos éticos

Se usaron los siguientes aspectos éticos para el desarrollo óptimo del presente trabajo de investigación:

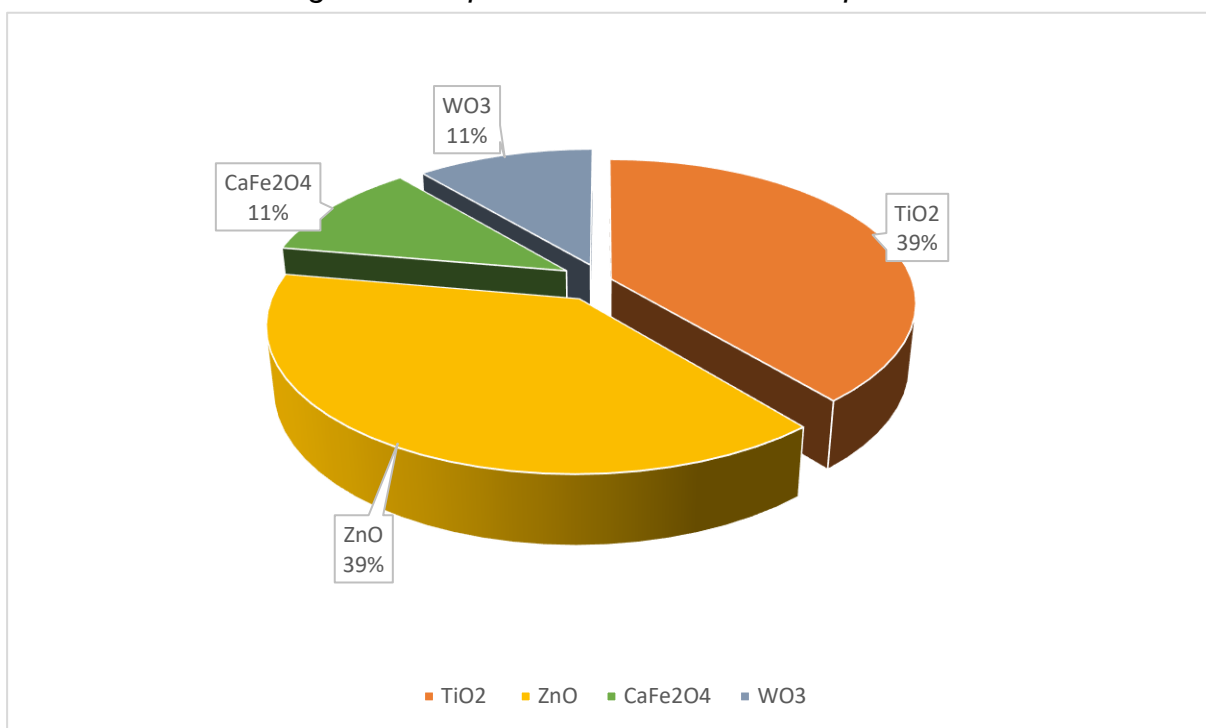
ISO 690, para el correcto uso y descripción de las referencias bibliográficas usadas.

Guía de productos observables de la Universidad César Vallejo, se respeta el código de ética estipulado por la universidad.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo al objetivo de estudio para determinar los aspectos más relevantes en la aplicación práctica de las tecnologías fotocatalíticas para la remediación de efluentes generados por el molino de aceite de palma se determinó el fotocatalizador más aplicado en la remediación de los efluentes generados por el molino de aceite de palma; donde al gráfico 2 respecto a la tabla 4 nos muestra que los fotocatalizadores más estudiados para reducir los niveles de OPI en el TPOME se encuentran entre el  $\text{TiO}_2$ , el  $\text{ZnO}$ , el  $\text{WO}_3$  y el  $\text{CaFe}_2\text{O}_4$  son los más frecuentemente investigados para la remediación de TPOME.

**Gráfico N°2:** *Fotocatalizador más aplicado en la remediación de los efluentes generados por el molino de aceite de palma*



*Elaboración propia*

Además; se tiene de acuerdo al gráfico 2 que el  $\text{TiO}_2$  y  $\text{ZnO}$  son los fotocatalizadores que presentan mayor porcentaje de uso en la remediación de los efluentes generados por el molino de aceite de palma con un 39% para ambos, así mismo se encuentran los fotocatalizadores  $\text{CaFe}_2\text{O}_4$  y  $\text{WO}_3$  con un 11%.

Ello es debido a que entre los diversos fotocatalizadores (p. ej.,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{WO}_3$ , etc.) empleados en la fotocatalisis heterogénea, el  $\text{TiO}_2$  es el más prometedor debido a su fuerte actividad fotocatalítica, no toxicidad, alta estabilidad química, bajo costo, alta transparencia a la luz visible.



Así mismo, de acuerdo con Haji Alhaji M. et al., 2017, en sus resultados de FTIR muestran un valor máximo de 1.406,50 y 1.452,50  $\text{cm}^{-1}$ , lo que indica que la anatasa de  $\text{TiO}_2$  se forma mientras que no aparece el pico a 2.900  $\text{cm}^{-1}$  indica que todos los compuestos orgánicos se han eliminado después de la calcinación.

Además, Alhaji Mohammed H. et al., 2018, explica el mecanismo que utiliza el  $\text{TiO}_2$  para ser considerado el mejor fotocatalizador; y es que, a medida que el  $\text{TiO}_2$  se expone a la radiación ultravioleta, absorbe un fotón de luz que hace que el  $\text{TiO}_2$  pase al estado excitado, lo que resulta en la formación de un par electrón-hueco; donde el agujero de electrones así formado migra a la superficie de titania y luego reacciona con  $\text{O}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$  para formar especies reactivas de oxidación ( $\text{O}_2^-$  y  $\cdot\text{OH}$ ) y estas especies reactivas son capaces de oxidar moléculas orgánicas en contacto con su superficie.

Así mismo, autores como Ng Kim H. et al., (2016, p.1), prepararon fotocatalizadores a base de  $\text{TiO}_2$  con 0,25–5,0 % obteniendo que el POME 26,77 % de la degradación de POME se logró con 1,5 g/l de 0,5 % en peso de  $\text{Ag/TiO}_2$  y 70 ml/min de caudal de  $\text{O}_2$ ; afirmando que la principal especie reactiva para la degradación de POME es punto radical libre OH.

Mientras que, para Sidik Dilaeleyana S. et al., (2020) en la tabla 4, las influencias del catalizador  $\text{ZnO}$ - modificado *C. citratus* se estudiaron para determinar la eliminación del color y la disminución del flujo del efluente secundario del molino de aceite de palma (POMSE) en un reactor fotocatalítico de membrana (MPR); apoyando que no solo es el más usado, si no también, es el que mejores resultados presenta; obteniendo que el rendimiento de  $\text{ZnO-CC}$  en términos de color es de 99,84 %, de DQO es 98,97 %, DBO es 96,24 % y eliminación de turbidez es de 99,89 % del POMSE tratado; donde se puede comprobar que la eliminación en todos los casos fue significativo.

Estos resultados son también respaldados por: Ng Kim H. et al., 2017, Zainuri Nur Z. et al., 2018, Wong Kok A. et al., 2019, Ng Kim H. y Cheng Chin K., 2016, Lam Sze Mun et al., 2018, Affam Augustine C. y Bistar Abdul R., 2020

**Tabla N°4:** Rendimiento comparativo de la remoción de diversos fotocatalizadores en los efluentes del molino de aceite de palma

Fotocatalizador	Concentración inicial de los contaminantes			Tiempo de aplicación	Eficiencia de la eliminación (%)			Autor (es)
	DQO	DBO	Color		DQO	DBO	Color	
TiO2								
TiO2 a 0.012 g/L	250	No indica	No indica	42.86 minutos	96.81	102.6	94.29	Haji Alhaji M. et al., 2017
TiO2/CdS a 2.0 g/L	300	No presenta	No presenta	240 minutos	100	No presenta	No presenta	Zangeneh H. et al., 2019
TiO2/ZnO a 0.026 g/L	No indica	No indica	No presenta	240 minutos	90	68	No presenta	Kee Ming W. et al., 2020
TiO2 a 6 g/L	350	250	No indica	42.86 minutos	90	79	83	Alhaji Mohammed H. et al., 2018
Ag/ TiO2 a 0.2 g/L	700	No presenta	No presenta	240 minutos	16	No presenta	No presenta	Chen Chin Kui et al., 2016
TiO2 a 0.9 g/L	170	No presenta	No presenta	42.86 minutos	80	No presenta	No presenta	Ng Kim Hoong et al., 2017
TiO2 a 1.10 g/L	250	No presenta	No presenta	240 minutos	52.53	No presenta	No presenta	Ng Kim H. et al., 2020
ZnO								

ZnO a 0.1 g/L	1443	807	4192	30 minutos	98.97	96.24	99.84	Sidik Dilaeleyana S. et al., (2020)
ZnO a 0.9 g/L	170	No presenta	No presenta	240 minutos	74.12	No presenta	No presenta	Ng Kim H. et al., 2017
ZnO-PEG a 0.5 g/L	No indica	No indica	No indica	120 minutos	92	101	73	Zainuri Nur Z. et al., 2018
ZnO a 1.0 g/L	50	No presenta	No presenta	120 minutos	96	No presenta	No presenta	Wong Kok A. et al., 2019
ZnO a 1.0 g/L	170	No presenta	No presenta	240 minutos	50	No presenta	No presenta	Ng Kim H. y Cheng Chin K., 2016
ZnO a 0.4 g/L	50	No presenta	No presenta	180 minutos	96	No presenta	No presenta	Lam Sze Mun et al., 2018
ZnO a 0.5 g/L	50	No presenta	No indica	120 minutos	36	No presenta	85	Affam Augustine C. y Bistar Abdul R., 2020
CaFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>								
CaFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> a 0.7 g/L	170 – 240	156	100	480 minutos	56	69	53	Charles A. y Cheng C., 2019
BiOBr/ MnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> a 0.2 g/L	100	No presenta	No presenta	300 minutos	94.7	No presenta	No presenta	Sin J. et al., 2020
WO <sub>3</sub>								

WO <sub>3</sub> a 0.5 g/L	200	No presenta	No indica	240 minutos	51.15	No presenta	96.21	Chen Yoke W. et al., 2017
WO <sub>3</sub> /ZnO a 1.0 g/L	50	No presenta	No presenta	240 minutos	68.3	No presenta	No presenta	Sin Jin Chung et al., 2019
Otros								
La/CaO a 3.0 g/L	No indica	No presenta	No presenta	240 minutos	54	No presenta	No presenta	Ghazali Siti et al., 2019
g-C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> a 0.2 g/L	No indica	No presenta	No presenta	420 minutos	71	No presenta	No presenta	Razali N. et al., 2021
Nd/BiOBr a 0.2 g/L	100	No presenta	No presenta	300 minutos	95.6	No presenta	No presenta	Sin Jin Chung et al., 2020
CuO a 0.15 g/L	No indica	No presenta	No presenta	180 minutos	66	No presenta	No presenta	Phang You Kang et al., 2021

*Elaboración propia*

Por otro lado, para determinar los aspectos más relevantes en la aplicación práctica de las tecnologías fotocatalíticas para la remediación de efluentes generados por el molino de aceite de palma se buscó identificar el rendimiento comparativo de la remoción de diversos fotocatalizadores aplicados en los efluentes generados por el molino de aceite de palma; siendo ello mostrado de acuerdo a la tabla 4, donde se detalla el rendimiento comparativo de la remoción de diversos fotocatalizadores; donde el rendimiento de los fotocatalizadores TiO<sub>2</sub> y ZnO se mostraron conformes con el límite máximo permitido de 50 mg/L de DQO.

Además, el promedio del porcentaje de eliminación del DQO usando fotocatalizadores está en rangos de 80 a 100%, de DBO en 60 al 90% y de color 90 al 100%.

Siendo ello corroborado por Haji Alhaji M. et al., 2017, quien presentó como máximo porcentaje de eliminación del DQO 59,43 al 96,81 % con 250 mg/L de contaminación de trome (DQO), usando una concentración inicial del fotocatalizador TiO<sub>2</sub> a 0.012 g/L. donde la concentración final de DQO (8 mg/L) estaba muy por debajo del límite de descarga estándar de 50 mg/L.

Por su parte Ng et al. (2017) informaron de la eliminación del 74,12% de DQO a partir de 170 mg/L iniciales bajo 240 min de irradiación UV utilizando ZnO como fotocatalizador. En otro estudio, Kee et al. (2020) informaron de la fabricación de fotoánodos de TiO<sub>2</sub>/ZnO/Zn y fotocátodos de TiO<sub>2</sub>/CuO/Cu que ayudaron a la separación de los portadores de carga, lo que resultó en un mejor rendimiento fotocatalítico hacia la degradación de TPOME y sus resultados demostraron más del 90% de eliminación de DQO a partir de 100 mg/L iniciales en 240 minutos de irradiación UV.

De hecho, la fotocatálisis de TiO<sub>2</sub> muestra una factibilidad técnica prometedora en el tratamiento de POME, pero su amplia aplicación está económicamente suprimida. Se postula que es más probable que se empleen tratamientos de base biológica (incluido el sistema de estanque abierto existente) como el enfoque de tratamiento principal para POME sobre TiO<sub>2</sub>-fotocatálisis.

Esto es particularmente cierto ya que los tratamientos de base biológica ofrecen un mejor índice de rendimiento para la POMA concentrada con un costo de tratamiento y tecnicismo necesarios comparativamente más bajos (NG Kim H., 2021, p.3).

Por último, se evaluaron los 25 estudios donde las características de los fotocatalizadores que influyen en el rendimiento fotocatalítico a la remediación de efluentes generados por el molino de aceite de palma se detallan en la tabla 5.

**Tabla N° 5:** Características de los fotocatalizadores que influyen en el rendimiento fotocatalítico

Fotocatalizador	DQO	SSA	Tamaño de las partículas (nm)	% de remoción DQO	Autor (es)
TiO2	250	No indica	100	96.81	Haji Alhaji M. et al., 2017
TiO2	350	130.0	No indica	90	Alhaji Mohammed H. et al., 2018
TiO2	150–170	11.34	45.7	80	Ng Kim Hoong et al., 2017
TiO2	150–170	8.73	70–100	78	Ng Kim H. y Cheng Chin K., 2016
TiO2	150–170	16.29	54.2	26.77	Ng Kim Hoong et al., 2016
TiO2	700	10	46	25	Chen Chin Kui et al., 2016
ZnO	No indica	6.2	280	43	Wong Kok A. et al., 2019
	No indica	10.2	430	56	
	No indica	18.4	850	96	
ZnO	No indica	No indica	25-150	92	Zainuri Nur Z. et al., 2018
	No indica	No indica	25-200	67	
	1443.34	No indica	25-200	98.97	
ZnO	No indica	No indica	6.6-42.9	98.06	Sidik Dilaeleyana S. et al., (2020)
	No indica	No indica	13.33-44	97.04	
	No indica	No indica	16.66-41.65	88.31	
CaFe2O	No indica	13.55	28.2	24	

	No indica	27.28	20.1	56	Charles Ashwin et al., 2019
	No indica	9.73	26.9	37	
<b>CaFe2O</b>	No indica	9.73	20-10 um	69.05	Charles A. y Cheng C., 2019
<b>Nb2O5</b>	No indica	No indica	No indica	91.7	Chin Ying Hui et al., 2018

*Elaboración propia*

De acuerdo con la tabla 5 para evaluar las características de los fotocatalizadores que influyen en el rendimiento fotocatalítico a la remediación de efluentes generados por el molino de aceite de palma se tiene que entre las características fisicoquímicas de los fotocatalizadores la superficie específica (SST) es una de las características principales para desempeñar un papel decisivo en el rendimiento fotocatalítico de un fotocatalizador; siendo ello corroborado por el 85 % de los investigadores; además, se comprobó que la mayoría de los fotocatalizadores de los autores estudiados presentan una SSA muy pequeña, inferior a 30 m<sup>2</sup>/g.

Ello debido a que el aumento del área superficial mejorará la adsorción de las moléculas orgánicas y posteriormente mejorará la actividad fotocatalítica del fotocatalizador Charles Ashwin et al., (2019).

Así mismo, Zainuri Nur Z. et al., 2018 afirma que la pérdida de área superficial aumenta el tamaño de las partículas y la disminución de la dispersión, todo ello ejerce un efecto adverso sobre la captación de luz y la adsorción de compuestos orgánicos.

De acuerdo con Haji Alhaji M. et al., 2017, las condiciones óptimas para los tres parámetros son 5,50 para el pH inicial, 4,84 mg para la dosificación del catalizador y 42,86 min para el tiempo y el porcentaje de eliminación de DQO, DBO y color están dentro del rango de 59,43–96,81 %, 48,05–102,68 % y 60,63–94,29% respectivamente; como se muestra en la tabla 4.

## V. CONCLUSIONES

De acuerdo a la búsqueda de determinar los aspectos más relevantes en la aplicación práctica de las tecnologías fotocatalíticas para la remediación de efluentes generados por el molino de aceite de palma se desarrolló la búsqueda de tres problemas específicos, detallando las conclusiones a continuación:

- I. El fotocatalizador más aplicado en la remediación de los efluentes generados por el molino de aceite de palma son el  $\text{TiO}_2$  y  $\text{ZnO}$ ; presentando mayor porcentaje de uso en la remediación de los efluentes generados por el molino de aceite de palma con un 39% para ambos, así mismo se encuentran los fotocatalizadores  $\text{CaFe}_2\text{O}_4$  y  $\text{WO}_3$  con un 11% de uso. Ello es debido a que entre los diversos fotocatalizadores (p. ej.,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{WO}_3$ , etc.) empleados en la fotocatálisis heterogénea, el  $\text{TiO}_2$  es el más prometedor debido a su fuerte actividad fotocatalítica, no toxicidad, alta estabilidad química, bajo costo, alta transparencia a la luz visible.
- II. El rendimiento comparativo de la remoción de diversos fotocatalizadores aplicados en los efluentes generados por el molino de aceite de palma de acuerdo a los fotocatalizadores  $\text{TiO}_2$  y  $\text{ZnO}$  se mostraron conformes con el límite máximo permitido de 50 mg/L de DQO. Además, el promedio del porcentaje de eliminación del DQO usando fotocatalizadores está en rangos de 80 a 100%, de DBO en 60 al 90% y de color 90 al 100%.
- III. Las características de los fotocatalizadores que influyen en el rendimiento fotocatalítico a la remediación de efluentes generados por el molino de aceite de palma se da por las características fisicoquímicas de los fotocatalizadores como es el caso de la superficie específica (SST), el cual es, una de las de las características principales para desempeñar un papel decisivo en el rendimiento fotocatalítico de un fotocatalizador; siendo ello corroborado por el 85 % de los investigadores; además, se comprobó que la mayoría de los fotocatalizadores de los autores estudiados presentan una SSA muy pequeña, inferior a 30  $\text{m}^2/\text{g}$ . Ello debido a que el aumento del área superficial mejorará la adsorción de las moléculas orgánicas y posteriormente mejorará la actividad fotocatalítica del fotocatalizador.



## VI. RECOMENDACIONES

De acuerdo con la búsqueda realizada de 25 estudios científicos a nivel mundial se pudo que la aplicación de tecnologías fotocatalíticas es muy prometedora para resolver el problema de la remediación de TPOME ofreciendo una tecnología sostenible y verde; pero también se pudo encontrar la falta de estudios realizados por ello se recomienda lo siguiente:

- I. A los futuros investigadores que amplíen en estudios centrados en las tecnologías fotocatalíticas y llevarla a la aplicación práctica; ya que, se descubrió que la mayoría de los trabajos publicados se centraban en la investigación a escala de laboratorio, por ello se recomienda realiza estudios a nivel real.
- II. También se recomienda estudiar las diferentes formas de diseño de reactores fotocatalíticos y realizar una comparación para la degradación de otros compuestos orgánicos, así se utilizará con mayor eficiencia la tecnología fotocatalítica.
- III. Así mismo, se recomienda ampliar en la aplicación que se le da a la tecnología fotocatalítica en diferentes corrientes de aguas residuales, ya que, es considerado una técnica con un proceso atractivo para la aplicación de diferentes contaminantes, por su posibilidad de degradación de diferentes variedades de sustratos químicos orgánicos.

## REFERENCIAS

1. ABRAM, Nicola K., et al. Oil palm–community conflict mapping in Indonesia: A case for better community liaison in planning for development initiatives. *Applied Geography*, 2017, vol. 78, p. 33-44. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2016.10.005>
2. AFFAM, Augustine Chioma; BISTAR, Abdul Rahman Bin. Oxidation of Palm Oil Mill Effluent Using Hydrogen Peroxide and Catalysed by UV Light/Zinc Oxide. En *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2020. p. 042025. Disponible en: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/736/4/042025>
3. ALHAJI, M. H., et al. Recent developments in immobilizing titanium dioxide on supports for degradation of organic pollutants in wastewater-A review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2017, vol. 14, no 9, p. 2039-2052. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s13762-017-1349-4>
4. ALHAJI, Mohammed Haji, et al. Photo-oxidation of pre-treated palm oil mill Effluent using cylindrical column immobilized photoreactor. *Process Safety and Environmental Protection*, 2018, vol. 117, p. 180-189. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.04.012>
5. BELLO, Mustapha Mohammed; RAMAN, Abdul Aziz Abdul. Trend and current practices of palm oil mill effluent polishing: Application of advanced oxidation processes and their future perspectives. *Journal of environmental management*, 2017, vol. 198, p. 170-182. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.04.050>.
6. AUBERT, P. M.; CHAKIB, A.; LAURANS, Y. Implementation and effectiveness of sustainability initiatives in the palm oil sector: a review. *Studies N 11/17*, IDDRI, Paris, France, 2017, vol. 56. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.104>
7. AUSTIN, K. G., et al. Shifting patterns of oil palm driven deforestation in Indonesia and implications for zero-deforestation commitments. *Land use*

- policy, 2017, vol. 69, p. 41-48. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.08.036>
8. BAKAR, Siti Nur Hatika Abu, et al. A review of moving-bed biofilm reactor technology for palm oil mill effluent treatment. *Journal of Cleaner Production*, 2018, vol. 171, p. 1532-1545. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.100>
  9. BUSCH, Jonah, et al. Reductions in emissions from deforestation from Indonesia's moratorium on new oil palm, timber, and logging concessions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015, vol. 112, no 5, p. 1328-1333. Disponible en: <https://doi.org/10.1073/pnas.1412514112>
  10. CHARLES, Ashwin; CHENG, Chin Kui. Photocatalytic treatment of palm oil mill effluent by visible light-active calcium ferrite: Effects of catalyst preparation technique. *Journal of environmental management*, 2019, vol. 234, p. 404-411. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.01.024>
  11. CHARLES, Ashwin, et al. Facile synthesis of  $\text{CaFe}_2\text{O}_4$  for visible light driven treatment of polluting palm oil mill effluent: Photokinetic and scavenging study. *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 661, p. 522-530. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.195>
  12. CHENG, Chin Kui, et al. Preparation of titania doped argentine photocatalyst and its photoactivity towards palm oil mill effluent degradation. *Journal of Cleaner Production*, 2016, vol. 112, p. 1128-1135. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.104>
  13. CHENG, Yoke Wang, et al. Photocatalytic restoration of liquid effluent from oil palm agroindustry in Malaysia using tungsten oxides catalyst. *Journal of cleaner production*, 2017, vol. 162, p. 205-219. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.023>
  14. CHENG, Yoke Wang, et al. Holistic process evaluation of non-conventional palm oil mill effluent (POME) treatment technologies: A conceptual and comparative review. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, vol. 409, p. 124964. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124964>

15. CHIN, Ying-Hui; SIN, Jin-Chung; LAM, Sze-Mun. A facile route for fabrication of hierarchical porous Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ZnO composites with enhanced photocatalytic degradation of palm oil mill effluent. *Materials Letters*, 2018, vol. 216, p. 8-11. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.12.141>
16. CHOWDHURY, Pankaj; NAG, Sharmistha; RAY, Ajay K. Degradation of phenolic compounds through UV and visible-light-driven photocatalysis: technical and economic aspects. *Phenolic Compounds-Natural Sources, Importance and Applications*, 2017, vol. 16, p. 395-417. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.5772/66134>
17. CÓRDOBA, Diana, et al. Understanding local perceptions of the impacts of large-scale oil palm plantations on ecosystem services in the Brazilian Amazon. *Forest Policy and Economics*, 2019, vol. 109, p. 102007. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2019.102007>
18. DING, Gong Tao, et al. Biomass production and nutrients removal by a newly-isolated microalgal strain *Chlamydomonas* sp in palm oil mill effluent (POME). *international journal of hydrogen energy*, 2016, vol. 41, no 8, p. 4888-4895. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.12.010>
19. DISLICH, Claudia, et al. A review of the ecosystem functions in oil palm plantations, using forests as a reference system. *Biological Reviews*, 2017, vol. 92, no 3, p. 1539-1569. Disponible en: <https://doi.org/10.1111/brv.12295>
20. EULER, Michael, et al. Oil palm expansion among smallholder farmers in Sumatra, Indonesia. *Journal of Agricultural Economics*, 2016, vol. 67, no 3, p. 658-676. Disponible en: <https://doi.org/10.1111/1477-9552.12163>
21. FOONG, Steve ZY, et al. Input–output optimisation model for sustainable oil palm plantation development. *Sustainable Production and Consumption*, 2019, vol. 17, p. 31-46. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2018.08.010>
22. GAMARALALAGE, Disni; SAWAI, Osamu; NUNOURA, Teppei. Degradation behavior of palm oil mill effluent in Fenton oxidation. *Journal of hazardous materials*, 2019, vol. 364, p. 791-799. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.07.023>

23. GAMARALALAGE, Disni; SAWAI, Osamu; NUNOURA, Teppei. Effect of reagents addition method in Fenton oxidation on the destruction of organics in palm oil mill effluent. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2020, vol. 8, no 4, p. 103974. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103974>
24. GÉRARD, Anne, et al. Oil-palm yields in diversified plantations: Initial results from a biodiversity enrichment experiment in Sumatra, Indonesia. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, vol. 240, p. 253-260. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.02.026>
25. GHAZALI, Siti Shariah; JUSOH, Rohayu; SHARIFFUDDIN, Jun Haslinda. Parameter Affecting Photocatalytic Degradation of POME using LaCa as Photocatalyst. *Materials Today: Proceedings*, 2019, vol. 19, p. 1173-1182. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.120>
26. Godswill, N.-N., Frank, N.-E. G., Walter, A.-N., Edson, M.-Y. J., Kingsley, T.-M., Arondel, V., ... Emmanuel, Y. (2016). Oil Palm. *Breeding Oilseed Crops for Sustainable Production*, 217–273. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-801309-0.00010-0>
27. Goh, K. J., Wong, C. K., & Ng, P. H. C. (2017). Oil Palm. *Encyclopedia of Applied Plant Sciences*, 382–390. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-394807-6.00176-3>
28. HAJI ALHAJI, Mohammed, et al. Modeling and optimization of photocatalytic treatment of pre-treated palm oil mill effluent (POME) in a UV/TiO<sub>2</sub> system using response surface methodology (RSM). *Cogent Engineering*, 2017, vol. 4, no 1, p. 1382980. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/23311916.2017.1382980>
29. HANSEN, Sune Balle, et al. Trends in global palm oil sustainability research. *Journal of cleaner Production*, 2015, vol. 100, p. 140-149. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.051>
30. ISA, Mohamed Hasnain, et al. Improved anaerobic digestion of palm oil mill effluent and biogas production by ultrasonication pretreatment. *Science of The*

Total Environment, 2020, vol. 722, p. 137833. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137833>

31. ISKANDAR, Muhammad Johan, et al. Palm oil industry in South East Asia and the effluent treatment technology—A review. *Environmental technology & innovation*, 2018, vol. 9, p. 169-185. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eti.2017.11.003>
32. JARUJAREET, Palist, et al. Bioaugmentation coupled with phytoremediation for the removal of phenolic compounds and color from treated palm oil mill effluent. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, vol. 26, no 31, p. 32065-32079. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-019-06332-2>
33. JIANG, Zhuoying, et al. A generalized predictive model for TiO<sub>2</sub>-Catalyzed photo-degradation rate constants of water contaminants through artificial neural network. *Environmental Research*, 2020, vol. 187, p. 109697. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envres.2020.109697>
34. JUSOH, Norela, et al. Selective extraction and recovery of polyphenols from palm oil mill sterilization condensate using emulsion liquid membrane process. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, vol. 27, no 18, p. 23246-23257. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-020-07972-5>
35. KEE, Ming-Wei, et al. Explicating charge transfer dynamics in anodic TiO<sub>2</sub>/ZnO/Zn photocatalytic fuel cell for ameliorated palm oil mill effluent treatment and synchronized energy generation. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 2020, vol. 391, p. 112353. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2019.112353>
36. LAM, Sze-Mun; WONG, Kok-Ann; SIN, Jin-Chung. Fabrication of flower-like ZnO Micro/Nanostructures for photodegradation of pre-treated palm oil mill effluent. En *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, 2018. p. 012003. Disponible en: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/112/1/012003>

37. LAW, M. C., et al. Modelling microwave heating of discrete samples of oil palm kernels. *Applied Thermal Engineering*, 2016, vol. 98, p. 702-726. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.01.009>
38. LOKMAN, Nur Aleya, et al. A brief review on biochemical oxygen demand (BOD) treatment methods for palm oil mill effluents (POME). *Environmental Technology & Innovation*, 2021, vol. 21, p. 101258. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101258>
39. MUÑOZ-CHILITO, José F.; RODRÍGUEZ-PÁEZ, Jorge E. ZnO-CeO<sub>2</sub> nanocomposites: Synthesis, characterization and evaluation of their action on polluting gases emitted by motorcycles. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, vol. 9, no 1, p. 104890. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2020.104890>
40. MUTSAERS, H. J. W. The challenge of the oil palm: using degraded land for its cultivation. *Outlook on Agriculture*, 2019, vol. 48, no 3, p. 190-197. Disponible en: <https://doi.org/10.1177/0030727019858720>
41. MUTSAERS, H. J. W. The challenge of the oil palm: using degraded land for its cultivation. *Outlook on Agriculture*, 2019, vol. 48, no 3, p. 190-197. Disponible en: <https://doi.org/10.1177/0030727019858720>
42. NAMBIAPPAN, Balu, et al. Malaysia: 100 years of resilient palm oil economic performance. *Journal of Oil Palm Research*, 2018, vol. 30, no 1, p. 13-25. Disponible en: <https://doi.org/10.21894/jopr.2018.0014>
43. NG, Kim Hoong. Adoption of TiO<sub>2</sub>-photocatalysis for palm oil mill effluent (POME) treatment: Strengths, weaknesses, opportunities, threats (SWOT) and its practicality against traditional treatment in Malaysia. *Chemosphere*, 2021, vol. 270, p. 129378. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129378>
44. NG, Kim Hoong; CHENG, Chin Kui. Photocatalytic degradation of palm oil mill effluent over ultraviolet-responsive titania: Successive assessments of significance factors and process optimization. *Journal of Cleaner Production*, 2017, vol. 142, p. 2073-2083. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.077>

45. Ng, Kim Hoong, Chea Hui Lee, Maksudur R. Khan, and Chin Kui Cheng. "Photocatalytic degradation of recalcitrant POME waste by using silver doped titania: Photokinetics and scavenging studies." *Chemical Engineering Journal* 286 (2016): 282-290. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.10.072>
46. NG, Kim Hoong, et al. Restoration of liquid effluent from oil palm agroindustry in Malaysia using UV/TiO<sub>2</sub> and UV/ZnO photocatalytic systems: A comparative study. *Journal of environmental management*, 2017, vol. 196, p. 674-680. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.078>
47. NG, Kim Hoong, et al. Integration of machine learning-based prediction for enhanced Model's generalization: Application in photocatalytic polishing of palm oil mill effluent (POME). *Environmental Pollution*, 2020, vol. 267, p. 115500. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115500>
48. NG, Kim Hoong; CHENG, Chin Kui. Photo-polishing of POME into CH<sub>4</sub>-lean biogas over the UV-responsive ZnO photocatalyst. *Chemical Engineering Journal*, 2016, vol. 300, p. 127-138. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.04.105>
49. NG, Kim Hoong, et al. Photocatalytic degradation of recalcitrant POME waste by using silver doped titania: Photokinetics and scavenging studies. *Chemical Engineering Journal*, 2016, vol. 286, p. 282-290. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.10.072>
50. NQOMBOLO, Azile, et al. Wastewater treatment using membrane technology. *Wastewater and Water Quality*, 2018, vol. 29. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.76624>
51. PERMPOOL, Napapat; BONNET, Sebastien; GHEEWALA, Shabbir H. Greenhouse gas emissions from land use change due to oil palm expansion in Thailand for biodiesel production. *Journal of Cleaner Production*, 2016, vol. 134, p. 532-538. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.048>
52. PHANG, You-Kang, et al. Green Synthesis and Characterization of CuO Nanoparticles Derived from Papaya Peel Extract for the Photocatalytic Degradation of Palm Oil Mill Effluent (POME). *Sustainability*, 2021, vol. 13, no 2, p. 796. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/su13020796>



53. PYE, Oliver. Commodifying sustainability: Development, nature and politics in the palm oil industry. *World Development*, 2019, vol. 121, p. 218-228. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2018.02.014>
54. QIAN, Ruifeng, et al. Charge carrier trapping, recombination and transfer during TiO<sub>2</sub> photocatalysis: An overview. *Catalysis Today*, 2019, vol. 335, p. 78-90. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2018.10.053>
55. Rayaroth, M. P., Escobedo, E., & Chang, Y.-S. (2019). Degradation studies of halogenated flame retardants. *Comprehensive Analytical Chemistry*. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/bs.coac.2019.11.003>
56. RAZALI, N. A. M., et al. The role of g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> in round-the-clock photocatalysis for POME. En *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2021. p. 012007. Disponible en: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1142/1/012007>
57. SANI, Sadiq; DASHTI, Arezoo Fereidonian; ADNAN, Rohana. Applications of Fenton oxidation processes for decontamination of palm oil mill effluent: A review. *Arabian Journal of Chemistry*, 2020. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2020.08.009>
58. SANTIKA, Truly, et al. Impact of palm oil sustainability certification on village well-being and poverty in Indonesia. *Nature Sustainability*, 2021, vol. 4, no 2, p. 109-119. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41893-020-00630-1>
59. SASWATTECHA, Kanokwan, et al. Assessing the environmental impact of palm oil produced in Thailand. *Journal of cleaner production*, 2015, vol. 100, p. 150-169. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.037>
60. SIDIK, Dilaeleyana Abu Bakar, et al. Performance of membrane photocatalytic reactor incorporated with ZnO-Cymbopogon citratus in treating palm oil mill secondary effluent. *Process Safety and Environmental Protection*, 2020, vol. 143, p. 273-284. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.06.038>
61. SILALERTRUKSA, Thapat, et al. Environmental sustainability of oil palm cultivation in different regions of Thailand: Greenhouse gases and water use


impact. *Journal of Cleaner Production*, 2017, vol. 167, p. 1009-1019. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.069>

62. SIN, Jin-Chung; CHIN, Ying Hui; LAM, Sze Mun. WO<sub>3</sub>/Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> nanoparticles-decorated hierarchical porous ZnO microspheres for enhanced photocatalytic degradation of palm oil mill effluent and simultaneous production of biogas. *En Key Engineering Materials*. Trans Tech Publications Ltd, 2019. p. 379-385. Disponible en: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.821.379>
63. SIN, Jin-Chung, et al. Fabrication of novel visible light-driven Nd-doped BiOBr nanosheets with enhanced photocatalytic performance for palm oil mill effluent degradation and *Escherichia coli* inactivation. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2020, vol. 140, p. 109382. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jpics.2020.109382>
64. SIN, Jin-Chung, et al. Constructing magnetic separable BiOBr/MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> as efficient Z-scheme nanocomposite for visible light-driven degradation of palm oil mill effluent and inactivation of bacteria. *Materials Letters*, 2020, vol. 275, p. 128112. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.128112>
65. TABASSUM, Salma; ZHANG, Yejian; ZHANG, Zhenjia. An integrated method for palm oil mill effluent (POME) treatment for achieving zero liquid discharge—a pilot study. *Journal of Cleaner Production*, 2015, vol. 95, p. 148-155. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.056>
66. TYSON, Adam; VARKEY, Helena; CHOIRUZZAD, Shofwan Al Banna. Deconstructing the palm oil industry narrative in Indonesia: evidence from Riau Province. *Contemporary Southeast Asia*, 2018, vol. 40, no 3, p. 422-448. Disponible en: <https://www.jstor.org/stable/26545302>
67. VIJAY, Varsha, et al. The impacts of oil palm on recent deforestation and biodiversity loss. *PloS one*, 2016, vol. 11, no 7, p. e0159668. Disponible en: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0159668>
68. WONG, Kok-Ann; LAM, Sze-Mun; SIN, Jin-Chung. Wet chemically synthesized ZnO structures for photodegradation of pre-treated palm oil mill effluent and antibacterial activity. *Ceramics International*, 2019, vol. 45, no 2, p. 1868-1880. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.10.078>

69. WONG, Lai-Peng; ISA, Mohamed Hasnain; BASHIR, Mohammed JK. Disintegration of palm oil mill effluent organic solids by ultrasonication: Optimization by response surface methodology. *Process Safety and Environmental Protection*, 2018, vol. 114, p. 123-132. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2017.12.012>
70. YASHNI, G., et al. Conventional and advanced treatment technologies for palm oil mill effluents: a systematic literature review. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 2021, vol. 42, no 12, p. 1766-1784. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1080/01932691.2020.1788950>
71. ZAINURI, Nur Zarifah, et al. Palm oil mill secondary effluent (POMSE) treatment via photocatalysis process in presence of ZnO-PEG nanoparticles. *Journal of water process engineering*, 2018, vol. 26, p. 10-16. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.08.009>
72. ZANGENEH, Hadis, et al. A novel L-Histidine (C, N) codoped-TiO<sub>2</sub>-CdS nanocomposite for efficient visible photo-degradation of recalcitrant compounds from wastewater. *Journal of hazardous materials*, 2019, vol. 369, p. 384-397. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.02.049>

# ANEXOS

## ANEXOS N° 1

 <b>UCV</b> UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO	<b>FICHA DE ANÁLISIS DE CONTENIDO</b>	
<b>DATOS DEL AUTOR:</b>		
<b>PAGINAS UTILIZADAS</b>	<b>AÑO DE PUBLICACIÓN</b>	<b>LUGAR DE PUBLICACIÓN</b>
<b>TIPO DE INVESTIGACIÓN:</b>		
<b>CÓDIGO:</b>		
<b>PALABRAS CLAVES:</b>	Photocatalytic, practical, technologies, application, remediation, effluents, generated, palm, oil, mill	
<b>FOTOCATALIZADOR MAS APLICADO EN LA REMEDIACIÓN</b>		
<b>RENDIMIENTO COMPARATIVO DE LA REMOCIÓN</b>		
<b>FOTOCATALIZADORES QUE INFLUYEN EN EL FOTOCATALÍTICO</b>		
<b>RESULTADOS:</b>		
<b>CONCLUSIONES:</b>		

*Elaboración propia*