

FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de **INGENIERÍA DE MINAS**

“FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA UV/TiO₂ APLICADA A LA REMOCIÓN DE ARSÉNICO DE LOS DRENAJE ÁCIDOS DE MINA”

Tesis para optar al título profesional de:

Ingeniero de minas

Forma: Artículo científico

Autor

Hilder Vargas Valdez

Asesor:

Mg. Gustavo Alberto Steven Jamanca Lino

<https://orcid.org/0000-0002-0557-8843>

Cajamarca - Perú

2023

JURADO EVALUADOR

Jurado 1 Presidente(a)	Gladys Sandi Licapa Redolfo	41379556
	Nombre y Apellidos	N° DNI

Jurado 2	Daniel Alejandro Alva Huamán	43006890
	Nombre y Apellidos	N° DNI

Jurado 3	Miguel Ricardo Portilla Castañeda	45209190
	Nombre y Apellidos	N° DNI

INFORME DE SIMILITUD

Tesis_en_forma_de_Art_culo_cientifico_Vargas_Valdez_Hilde...

ORIGINALITY REPORT

9%

SIMILARITY INDEX

9%

INTERNET SOURCES

2%

PUBLICATIONS

3%

STUDENT PAPERS

PRIMARY SOURCES

1

hdl.handle.net

Internet Source

3%

2

doc.contraloria.gob.pe

Internet Source

1%

3

repositorio.upn.edu.pe

Internet Source

1%

4

1library.co

Internet Source

1%

5

Submitted to Universitat Politècnica de València

Student Paper

<1%

6

tesis.pucp.edu.pe

Internet Source

<1%

7

www.transredes.com

Internet Source

<1%

8

Submitted to unsaac

Student Paper

<1%

9

patents.google.com

Internet Source

<1%

DEDICATORIA

A mis padres por ser un ejemplo y un aliado incondicional durante la culminación de mi segunda carrera, por la educación, consejos, y querer lo mejor para mí, y estar conmigo durante todo el proceso de mi carrera.

AGRADECIMIENTO

A mis padres por ser siempre el soporte que he necesitado durante el transcurso de mi carrera y no permitir que flaqueara en ningún momento y permitir culminar mi segunda carrera.

En adición, al Mg. Gustavo Jamanca por haber sido el mentor y asesor de mi tesis de investigación, su guía metodológica en el diseño de los experimentos presentados ha sido de gran valía.

Finalmente, al Mg. Yury Vásquez por su soporte en la conceptualización del diseño del reactor presentado en la Figura 12, el cual está orientado a futuras pruebas experimentales, y ayudara a dar el siguiente paso a esta investigación.

Tabla de contenido

JURADO EVALUADOR	2
INFORME DE SIMILITUD	3
DEDICATORIA	4
AGRADECIMIENTO	5
Tabla de contenido	6
ÍNDICE DE TABLAS	7
ÍNDICE DE FIGURAS	9
RESUMEN	10
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	11
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA	29
CAPÍTULO III. RESULTADOS	36
CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	47
REFERENCIAS	51
ANEXOS	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	17
<i>Principales características fisicoquímicas típicas del DAM</i>	17
Tabla 2	18
<i>Principales eventos relacionados al DAM en américa en los últimos 15 años</i>	18
Tabla 3	26
<i>Cantidad de PAM de “muy alto” riesgo por regiones: Gestionados vs sin gestionar</i>	27
Tabla 4	27
<i>Regiones que tienen PAM sin gestionar (relaves y desmonte) de riesgo “muy alto” y “alto”</i>	27
Tabla 5	31
<i>LMP’S para la descarga de efluentes líquidos de actividades mineras</i>	32
Tabla 6	34
<i>Diseño experimental</i>	34
Tabla 7	34
<i>Datos que serán de utilidad para comparar las muestras</i>	34
Tabla 8	37
<i>Valores del DAM medidos in situ</i>	37
Tabla 9	38
<i>Resultados de la M1 antes y después del tratamiento con TiO₂</i>	38
Tabla 10	39
<i>Análisis comparativo de la Muestra N° 01 y LMP’S</i>	39
Tabla 11	39
<i>Análisis comparativo de la Muestra N° 01 al aplicarse TiO₂ al 10% y LMP’S</i>	39
Tabla 12	40
<i>Análisis comparativo de la Muestra N° 01 al aplicarse TiO₂ al 15% y LMP’S</i>	40
Tabla 13	40
<i>Análisis comparativo de la Muestra N° 01 al aplicarse TiO₂ al 20% y LMP’S</i>	40
Tabla 14	42
<i>Resultados de la fotocatalisis con luz solar</i>	42

Tabla 15	44
<i>Resultados con luz UV para Hierro, Arsénico y Plomo</i>	44
Tabla 16	44
<i>Resultados de la fotocatalisis con luz UV para otros metales</i>	44

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	13
<i>Típico ambiente con drenaje ácido de mina en España</i>	13
Figura 2	19
<i>Diagramas Pourbaix del hierro (Fe) y arsénico (As)</i>	19
Figura 3	21
<i>Mecanismo de la fotocatalisis con TiO₂</i>	21
Figura 4	23
<i>Aplicaciones fotocatalíticas del TiO₂</i>	23
Figura 5	24
<i>Mecanismo foto inducida de dióxido de titanio</i>	24
Figura 6	30
<i>Diseño experimental del tratamiento de la muestra de agua ácida con TiO₂</i> ,.....	30
Figura 7	36
<i>Ubicación geográfica de la mina artesanal el Tingo</i>	36
Figura 8	36
<i>Ubicación de la M1 y M2 para las pruebas de laboratorio</i>	37
Figura 9	41
<i>Concentración de Fe, antes y después del tratamiento con TiO₂</i>	41
Figura 10	42
<i>Concentración de As, antes y después del tratamiento con TiO₂</i>	42
Figura 11	43
<i>Resumen de resultados</i>	44
Figura 12	45
<i>Diseño del sistema de fotocatalisis. (Izquierda) Vista completa, (Derecha) Vista interior</i>	45

RESUMEN

La presente investigación tiene por finalidad medir la remoción de metales pesados aplicando nanopartículas mediante fotocátalisis heterogénea en un drenaje ácido generado por la mina artesanal el Tingo, siendo una alternativa de solución para poder tratar este drenaje ácido de mina, que es ocasionada por las labores mineras antiguas o son provocados de manera natural al contacto con rocas mineralizadas como los sulfuros.

Los drenajes ácidos de mina (DAM), es uno de los principales retos que las compañías mineras deben lidiar día a día. A pesar del éxito de los métodos convencionales, algunos elementos como el Arsénico son de difícil remoción, incluso en altas condiciones básicas, por lo cual, se necesitan explorar nuevos métodos de remediación ambiental. Busca expandir el conocimiento de la fotocátalisis heterogénea UV, una técnica que usa la nanotecnología para remover compuestos tóxicos y que ha sido probada con éxito en las aguas servidas y soluciones orgánicas, sin embargo, las aplicaciones para agua ácida de mina, ha sido poco explorada en la literatura. Los resultados de una serie de pruebas experimentales usando soluciones DAM obtenidas del distrito de Hualgayoc, Cajamarca, en un ambiente irradiado por la luz solar y ultravioleta, presentan una remoción máxima del Arsénico superior al 87% para el Arsénico a un pH de 2.5, y a una concentración del 10% de TiO₂, luego de una hora de agitación e irradiación de luz ultravioleta. Los resultados se pueden aprovechar como punto de partida para futuras y nuevas investigaciones que favorezcan al desarrollo y aplicación de tecnologías sostenibles en la industria minera, el cual puede ser planteado como un tratamiento aplicable en la minería moderna. Concluyéndose que es un método adecuado y eficiente en la remoción de arsénico.

Palabras claves: Nanotecnología, drenaje ácido de mina, fotocátalisis heterogénea, metales pesados, remediación ambiental.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

Las actividades humanas en los últimos tiempos han generado el impacto y la contaminación de muchos ecosistemas, lo cual es un problema común en las regiones que se encuentran en desarrollo. De manera específica, las actividades mineras (activas o abandonadas) producen grandes cantidades de flujos ácidos, llamados drenaje ácido de mina (DAM), que son los principales pasivos medioambientales de alto impacto en los ambientes acuáticos, como se puede apreciar en la figura 1.

En la ejecución de este estudio se tomarán en cuenta varios criterios y parámetros, basado en la aplicación de nanopartículas de TiO₂ para poder asegurar la remoción de metales pesados de los drenajes ácidos donde se podrían utilizar el método de fotocátalisis heterogénea; además, la minería, al ser una actividad que realiza extracción de minerales y procesos que originan efluentes contaminantes, los cuales al estar en contacto directo con el ambiente provocan drenajes ácido que deben tratarse de forma adecuada e inmediata para prevenir daños al medio ambiente.

Según Espinosa, Hidalgo, y Delgado (2016) en el artículo “Diseño de un sistema de tratamiento para bajar los niveles de contaminación en los drenajes ácidos de mina basado en proceso de lodos de alta densidad (HDS)”, define a los drenajes ácidos que son generados por las minas, como el que ocurre de forma natural, pero se incrementa cuando la minería desarrolla sus actividades como la explotación de minerales, perturbando áreas mineralizadas que van quedando expuestas al medio ambiente como son los tajos, esto genera drenaje ácido, contaminado el agua de los ríos, lagunas, el suelo, etc.

Según el peruano Santiago (2012) describe que en el Perú la aplicación de nanopartículas como tratamiento no es utilizada a gran escala en drenajes ácidos, pero es una gran alternativa al aplicarse en la minería ya que en estos se generan la mayor parte de efluentes contaminantes, por las mismas actividades mineras; los estudios por buscar una

solución en el tratamiento de drenajes ácidos, así como también la remoción de metales pesados ha conllevado a diferentes alternativas de solución, como el uso de nanopartículas como una solución, que en la actualidad es poco usada, en el caso de Perú se han hecho estudios, pero mas no son aplicados por las industrias mineras.

Vega (2015) se menciona que la nanotecnología en Perú está recién empezando a surgir gracias al esfuerzo de los grupos de investigación, pero que no existen centros de excelencia con la infraestructura suficiente para realizar los estudios, y los laboratorios existentes necesitan mejorar sustancialmente su equipamiento, dando a conocer que la evolución de la nanotecnología en Perú solo será posible reconociendo los temas más importantes y prioritarios en la fase inicial de la gestión científico técnica, y la creación de centros de excelencia con equipamiento moderno y nuevas tecnologías.

la nanotecnología en los últimos tiempos se ha convertido en una gran elección de solución para el tratamiento de los drenajes ácidos de mina y la remoción de metales pesados que podrían perturbar el medio ambiente como al suelo y agua para su aprovechamiento (Chavez, 2018). Según Hiyagon y Guerra (2012) señalo que se calculó la eficiencia para cada tratamiento y diferentes procedimientos y sistemas, obteniendo un resultado de remoción que supera al 80% de plomo al aplicar como tratamiento la nanotecnología de aguas obtenidas de drenajes ácidos de mina, al aplicar la nanotecnología. Entonces podemos decir que de acuerdo con lo mencionado a estudios realizados la aplicación de fotocátalisis heterogénea es una alternativa de gran escala a utilizar en la remoción de metales pesados aplicados por las industrias mineras para prevenir diferentes conflictos medioambientales y sociales, así como también la contaminación del suelo, agua y afecte negativamente al medio ambiente.

Figura 1.
Típico ambiente con drenaje ácido de mina en España.



Fuente: (Banco de Imágenes Geológicas, 2021).

Escuadra, et al. (2015) en el artículo de la Universidad de Zaragoza, de España titulado: “Aplicación de nano fotocatalisis con TiO₂ como tratamiento final de agua de salida de depuradora” menciona que: En los últimos años la nanotecnología ha dado a conocer numerosos productos hechos a base de TiO₂ al ver su eficiencia y efectividad al remover metales pesados.

De acuerdo con lo revisado surge esta pregunta ¿la aplicación de nanopartículas mediante fotocatalisis heterogénea en qué medida removerá los metales pesados del drenaje acido de la mina artesanal el Tingo – Cajamarca 2022?

En este sentido se desarrolla la investigación con el objetivo general: Medir la remoción de los metales pesados aplicando nanopartículas mediante fotocatalisis heterogénea en el drenaje acido de la mina artesanal el Tingo - Cajamarca 2022. Los objetivos específicos: señalar las características fisicoquímicas de las aguas de drenajes ácidos de la mina artesanal El Tingo antes y después del tratamiento. Determinar las características fisicoquímicas de las aguas del drenaje minero después de aplicar la nanotecnología mediante fotocatalisis heterogénea.

El presente trabajo de investigación tiene hipótesis debido a que es un diseño experimental.

La hipótesis es: La aplicación de fotocatalisis heterogénea usando nanopartículas para el tratamiento de drenajes mineros removerá significativamente los metales pesados contenidos como iones dentro de estas aguas de la mina artesanal el Tingo-Cajamarca 2022. Siendo un tratamiento que involucra diferentes pruebas en laboratorio que garantizan la remoción de los metales en el agua a través de análisis químicos por volumetría más espectrometría de masas.

Como antecedente Granda, Hincapié, y Lopera (2018) presenta un artículo de investigación titulado: “Tratamiento de residuos de laboratorio vía fotocatalisis heterogénea con TiO₂” teniendo como objetivo determinar el porcentaje y tiempo para disminuir la coloración de las aguas residuales, la contaminación del agua ha generado numerosos problemas medioambientales en el agua y en el suelo, para esto se ha investigado muchos métodos para la descontaminación y remoción de contaminantes en el agua, debido a esto propone una alternativa de solución en el tratamiento de aguas utilizando fotocatalisis heterogénea con nanopartículas de TiO₂, por lo que este método permite una degradación de alrededor del 70% en un periodo de dos horas dando a conocer la viabilidad para una posible implementación de este proceso para remover de contaminantes en el agua.

Así también, Chacon (2018) presenta su tesis titulada: “Reducción de microorganismos del agua en la zona rural de la Esperanza”, el cual tiene como objetivo de comprobar la eliminación de microorganismos presentes en el agua de la ciudad Esperanza Alta en Huaral, usando nanopartículas de plata (NPsAg-Ro). Se procedió a medir la cantidad de microorganismos de la primera muestra obtenidas en el rio, el cual se obtuvo resultados de 700 NMP/100mL el total de coliformes, 540 NMP/100mL en coliformes fecales, 240 NMP/100mL. Se aplicó 1 ml de NPsAg-Ro para 2L de muestra agua y se esperó 24 horas

para retirar las muestras, después se las llevó a analizar y los resultados obtenidos fueron de 100% de la eliminación coliformes totales.

Lozana y Rojas (2018) presenta su artículo de investigación titulado: “Nanotecnología aplicada a remediación ambiental”, con el objetivo de diseñar nuevos nanomateriales con propiedades catálicas, fotocatalisis, ópticas, dosimétricas, magnéticas y eléctricas, que permitan el desarrollo de innovaciones tecnológicas, sin embargo, en los últimos años, el desarrollo y la implementación de nanotecnologías ambientales sostenibles para gestionar y remediar los impactos ambientales ha aumentado significativamente. Dado que ya existe experiencia en varios sectores, es una tecnología en constante evolución, razón por la cual se están investigando y desarrollando diversos enfoques para la descontaminación de efluentes de aguas ácidas, ya que la nanotecnología cubre una amplia variedad de materiales en muchas disciplinas.

Tapia y Huanca (2019) presenta su tesis titulada: “Remoción de arsénico en agua proveniente de río Tambo sector Quelgua con nanopartículas de óxido de hierro soportadas en zeolita” con el objetivo de realizar una evaluación de la remoción de arsénico del agua del río Tambo sector Quelgua usando nanopartículas de óxido de hierro soportadas con zeolita, en la actualidad existe gran variedad de micro adsorbentes, sin embargo se nota un creciente interés en centrar la investigación en el uso de nanomateriales para ver si pueden proporcionar buenos resultados utilizando nanopartículas de óxido de hierro (conseguido a través de la corrosión y molienda mecánica), el TiO₂ y manganeso para remover metales como arsénico y fluoruros presentes en el agua, así mismo se debe plantear una alternativa de solución para separar de dichas nanopartículas del agua y logra remover los metales pesados producto de drenajes ácidos mineros.

También, en la tesis titulada “Influencia de la concentración de TiO₂ y tiempo de residencia, en el proceso de fotocatalisis heterogénea como sistema remoción de Fe²⁺ en

aguas ácidas de mina, Cajamarca 2018”, nos indica que la concentración más adecuada y donde los mejores resultados de remoción de iones de Fe²⁺ se obtuvieron utilizando 15% de TiO₂, porque a mayor cantidad de material semiconductor (TiO₂) el proceso fotocatalítico genera más electrones, originando que el proceso sea mucho más rápido, obteniendo un resultado de 74,57% de remoción de hierro, se llegó a la conclusión que el análisis con respecto al tiempo, que a mayor tiempo mayor es el porcentaje de eliminación de iones de Fe²⁺. podemos afirmar que es viable, utilizar el proceso de fotocatalisis heterogénea en el la purificación y reducción de contaminantes. Escobal, Chuquilín, y Martínez (2018).

Como base teórica, (Linares y González (2019) de la universidad católica de Colombia nos mencionan que, utilizando nanomateriales en el tratamiento para mejorar los índices de calidad del agua, las nanopartículas en los últimos años han venido tomando una gran importancia para el tratamiento de sistemas de agua que ofrece una rápida descontaminación, los diferentes tratamientos como la nano ciencia, nanotecnología. Así también las nanopartículas se evidencian que tiene un gran potencial como un campo lleno de posibilidades para el tratamiento de aguas acidas producto de drenajes mineros.

Nevárez, et al. (2017), estudiantes de Ecuador y Japon mencionan en su articulo titulado “Fotocatálisis: Inicio, actualidad y perspectivas a través del TiO₂, que tienen como objetivo explicar cómo llevo a considerarse a la fotocatalisis heterogénea como un método verde es decir de energía limpia para combatir la contaminación ambiental que existe hoy en día, detallando una de las mejores estrategias para la síntesis y modificación del TiO₂, es la aplicación del TiO₂. Para poder utilizar este método a una escala industrial requiere aumentar la eficiencia de su reacción fotocatalítica en su superficie, es necesario ampliar la superficie específica del fotocatalizador, este parámetro está relacionado con la fotoactividad y nanomorfología del material. Teniendo en cuenta la importancia y el progreso de la

fotocatálisis se han conocido muchos métodos para sintetizar nanopartículas de dióxido de titanio (TiO₂) con diferentes propiedades y características. Se han desarrollado muchas técnicas de modificación para aprovechar el espectro visible, como la incorporación de agentes dopantes, la formación de heteroestructuras con óxidos semiconductores o con colorantes, que aumenta una mayor eficiencia y la importancia de las reacciones fotocatalíticas en materia de remediación ambiental. Los radicales libres hidroxilos (OH) y superóxido (O₂) formados durante la fotocatalisis, han despertado un gran interés en aplicaciones para el tratamiento y remediación ambiental ya que es capaz de oxidar y transformar la materia orgánica e inorgánica y convertirla en CO₂ y H₂O. De esta forma, se pueden degradar sustancias tóxicas.

Por otro lado, “El agua ácida es una denominación para las soluciones con un pH < 6.0 y generalmente con iones metálicos disueltos, sulfatos, metaloides y elementos de tierras raras” (Taylor, Pape, & Murphy, 2005). El drenaje se forma a partir del contacto del oxígeno y el agua con minerales sulfurados, como piritita, marcasita, arsenopiritita y otros sulfuros de hierro. La presencia de bacterias como *Acidithiobacillus ferrooxidans*, o *Acidithiobacillus thiooxidans*, aceleran la oxidación del ion ferroso a férrico, lo cual produce el característico color rojizo, aunque la gama de colores va desde el negro al claro, pasando por tonos verdes, azules y rojos. Aunque la formación de este tipo de flujos se da de manera natural, el desarrollo de las operaciones mineras acelera su generación, debido a que permite el ingreso de altas cantidades de oxígeno a las labores de mina que tienen sulfuros, y provocan una alta exposición de estos minerales al ambiente, agua y aire, generando altos caudales de DAM que deben ser evacuados diariamente para permitir el avance de las labores (Taylor, Pape, & Murphy, 2005). Las principales características fisicoquímicas del DAM se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1.

Principales características fisicoquímicas típicas del DAM

Característica	Unidad	DAM	Límite promedio anual (ríos)
pH	upH	2.5	6 - 9
Color	-	rojizo	Transparente
Sólidos en suspensión	mg/lit	> 25	25
Arsénico Total	mg/lit	> 10	0.08
Cadmio Total	mg/lit	> 0.6	0.04
Cromo Hexavalente (*)	mg/lit	> 0.1	0.08
Cobre Total	mg/lit	> 60	0.4
Hierro (disuelto)	mg/lit	> 1000	1.6
Plomo Total	mg/lit	> 2.0	0.16
Mercurio Total	mg/lit	> 1.0	0.0016
Zinc Total	mg/lit	> 1.5	1.2

Fuente: (MINAM, 2010).

Los drenajes ácidos están muy extendidos en un yacimiento minero y no todos están debidamente controlados ni mapeados. Para agravar el problema, la minería informal no cuenta con planes de control y/o remediación ambiental y vierten estos flujos directamente a los ríos de manera consensuada. Por otro lado, para la minería formal, aunque la mayoría de los flujos de DAM son contenidos y tratados antes de su vertimiento final, algunos flujos de labores abandonadas llegan a ríos y lagunas de manera subterránea o en épocas de lluvia, provocando incidentes y accidentes ambientales. De hecho, la intrusión de iones metálicos en el agua aumenta la mortalidad de peces y plantas y fuerza a varias especies a migrar (Masindi & et al., 2022). Además, el contacto directo con el agua ácida en el cuerpo humano puede provocar una serie de irritaciones y lesiones en la piel. La región de Sudamérica, y el Perú no ha sido ajeno a estos problemas ambientales. Solo para revisar algunos ejemplos, se ha resumido en la Tabla 2 los eventos ambientales más significativos de los últimos 15 años.

Tabla 2.

Principales eventos relacionados al DAM en América en los últimos 15 años

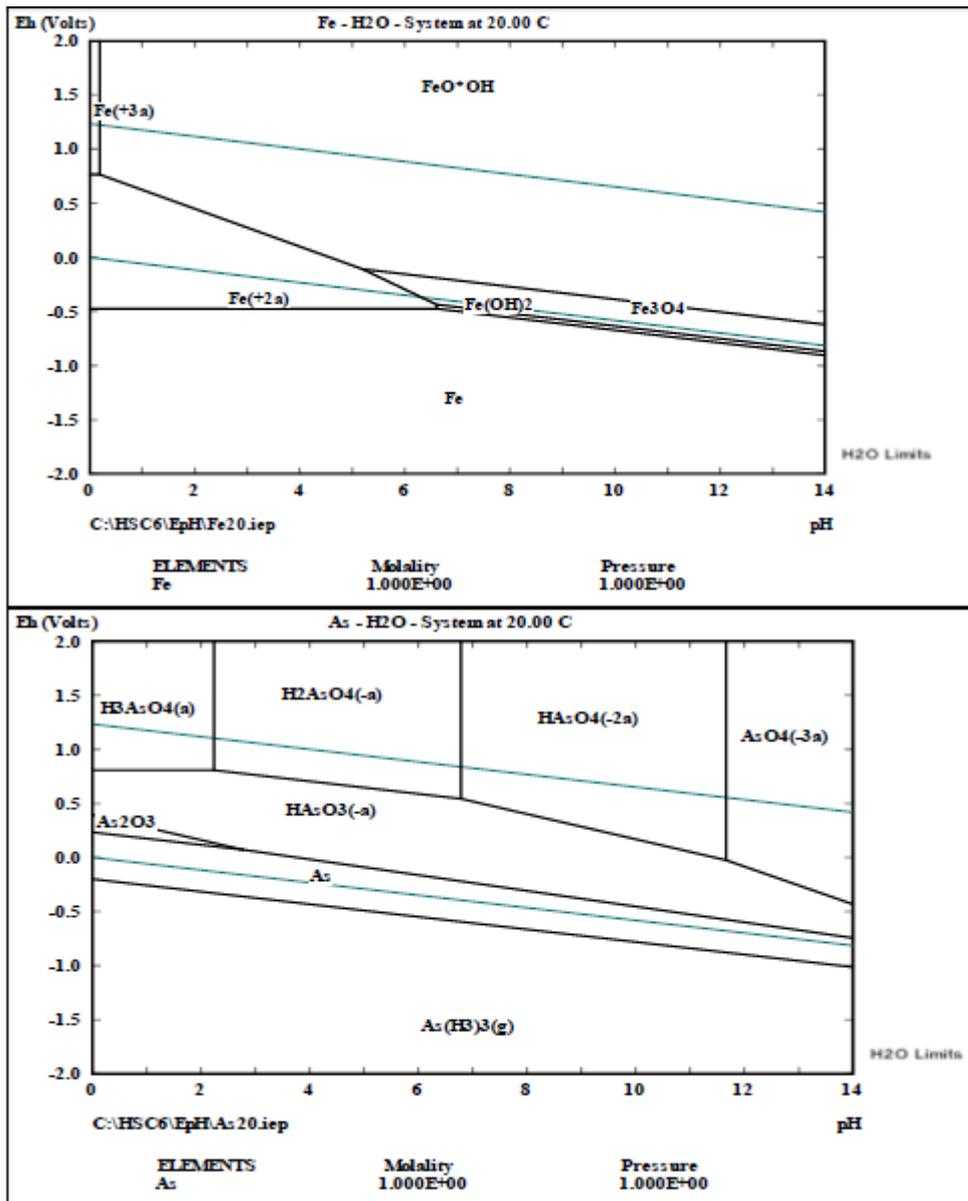
Lugar	Año	Impacto ambiental
Mina Farallón.Nyrstar, México.	2009	Probable impacto a la salud de los pobladores.
Minera Yanacocha, Cajamarca -Perú	2014	Contaminación a las comunidades de San José y al río Grande.
Minas abandonadas, sur de	2014	Desborde de lodo contaminado hacia los cuerpos de agua que

Arizona, EE. UU.		alimentan al Lago Patagonia
Mina abandonada GoldKing. EE. UU.	2015	Fuga de agua ácida consedimentos extendidos en 160 km

Fuente: (Grufides, 2015), (Defiende la sierra, 2017).

Aunque la mejor práctica es identificar la generación de núcleos de DAM para aislarlos y minimizar su generación, las medidas que se han implementado a escala industrial están centradas en procesar el DAM una vez generado (Masindi & et al., 2022). Los métodos de tratamiento se basan en métodos activos (con adición de reactivos y/o energía) o métodos pasivos (basados en reacciones de oxidación-reducción). Debido a las grandes cantidades de agua ácida generada por día, la mayoría de las unidades mineras utilizan métodos basados en la neutralización con óxido de calcio y otros compuestos de pH básico (Masindi & et al., 2022). Este método aumenta el pH hasta un rango de 8 a 10, lo cual es suficiente para precipitar los iones metálicos en forma de hidróxidos, como se ve que sucede con el hierro en el diagrama de Pourbaix de la Figura 2.

Figura 2.
Diagramas Pourbaix del hierro (Fe) y arsénico (As)



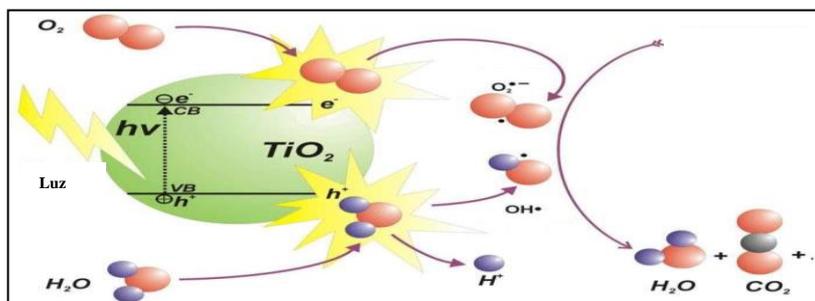
Fuente: (Vargas, Jamanca, & Vásquez, 2023).

Este diagrama es usado para interpretar y predecir el estado de los elementos metálicos a distintas condiciones de pH y potencial redox. Como se puede mostrar en el diagrama, el hierro (y la mayoría de los metales), pasan de iones a hidróxidos a partir de pH 7, convirtiéndose en sólidos, factibles de decantar para ser bombeado a su disposición final. En general, de acuerdo con la estabilidad química, los metales que pueden precipitar son: cobre (Cu), plomo (Pb), zinc (Zn), níquel (Ni), cadmio (Cd), hierro (Fe), manganeso (Mn), aluminio (Al), cromo-III (Cr-III), antimonio (Sb), arsénico-V (As-V), plata (Ag), selenio (Se), talio (Tl) y berilio (Be). Los hidróxidos formados son sedimentados mediante la adición

de floculantes y coagulantes, por lo que son necesarios grandes estanques de decantación y altos tiempos de retención (24 – 48 horas), para producir una capa de lodos de una densidad de 1050 - 1100 gramos por litro, suficiente para ser bombeado a la presa de relaves para su deposición final.

Aunque la mayoría de los iones metálicos se pueden separar con este método, algunos metales altamente nocivos no reaccionan con el control del pH, como el mercurio, el molibdeno, el cromo-VI (Cr-VI) y el arsénico III (As-III) (Taylor, Pape, & Murphy, 2005), que son difíciles de ser precipitados. El As-III no precipita con métodos convencionales, como se puede decir que en el segundo diagrama de Pourbaix mostrado en la Figura 2, donde este metal está en estado acuoso en todo el rango de pH, manteniendo su forma iónica incluso en pH superiores a 9.0. El arsénico-III es uno de los elementos más tóxicos y tiene un efecto crónico en los seres humanos, causando con afectaciones cutáneas como lesiones, hiperpigmentación, hiperqueratosis, cáncer a la piel, daño al hígado y pulmones (Carabantes y Fernicola, 2003). La ATSDR (Agencia para sustancias tóxicas y el registro de enfermedades, con sede en Atlanta – Georgia - EE. UU.) reconoce los efectos del arsénico a nivel de los sistemas gastrointestinal, hepático, renal, cardiovascular, neurológico, respiratorio, reproductivo; efectos dérmicos, hematopoyéticos – hematológicos, efectos carcinógenos y otros daños con evidencias en desarrollo (ATSDR, 2022).

Figura 3.
Mecanismo de la fotocatalisis con TiO₂



Fuente: (Ibhadon & Fitzpatrick, 2013).

En la actualidad, la nanotecnología ha surgido como una gran alternativa para la remediación ambiental y es por ello por lo que buscamos aplicarla para el tratamiento del arsénico y otros metales disueltos en el DAM. La técnica seleccionada es la fotocatalisis heterogénea, donde un material semiconductor cumple la función de catalizador para la electrolisis del agua y la generación de iones OH⁻ a partir de una cadena de compuestos orgánicos (Ibhadon & Fitzpatrick, 2013). La cual también debería formar hidróxidos y complejos a partir de los metales disueltos en una solución. La adición de estas partículas se complementa con una fuente de energía lumínica, que puede ser luz solar o ultravioleta (UV) para generar el mecanismo de reacción (Ver Figura 3). Actualmente, la fotocatalisis tiene varias aplicaciones, en la limpieza de aguas servidas, y metales pesados y su capacidad para la eliminación del arsénico y mercurio, así como la descomposición de compuestos orgánicos como alcoholes, ácidos carboxílicos, derivados fenólicos y aromáticos clorados; estos últimos son transformados en compuestos de agua, dióxido de carbono y ácidos minerales. Por ello, este proceso puede ser aplicado como bactericida para el consumo de agua potable, degradación de materia orgánica en soluciones ácidas (Ibhadon & Fitzpatrick, 2013), limpieza de sistemas de aire, remoción de pesticidas del agua, aplicaciones médicas, e incluso la producción de hidrógeno. Diversos ensayos han comprobado una efectiva remoción de iones metálicos como Cromo (94%), Cobre (91%), Plomo (98%), Cadmio (97%), Arsénico (99,9%), aunque no exactamente para el DAM (Ibhadon & Fitzpatrick, 2013). Por otro lado, aunque la lista de nanomateriales semiconductores es larga, uno de los principales es el TiO₂, ya que es un material económico, no reactivo e incluso inocuo para el cuerpo humano en pequeñas cantidades.

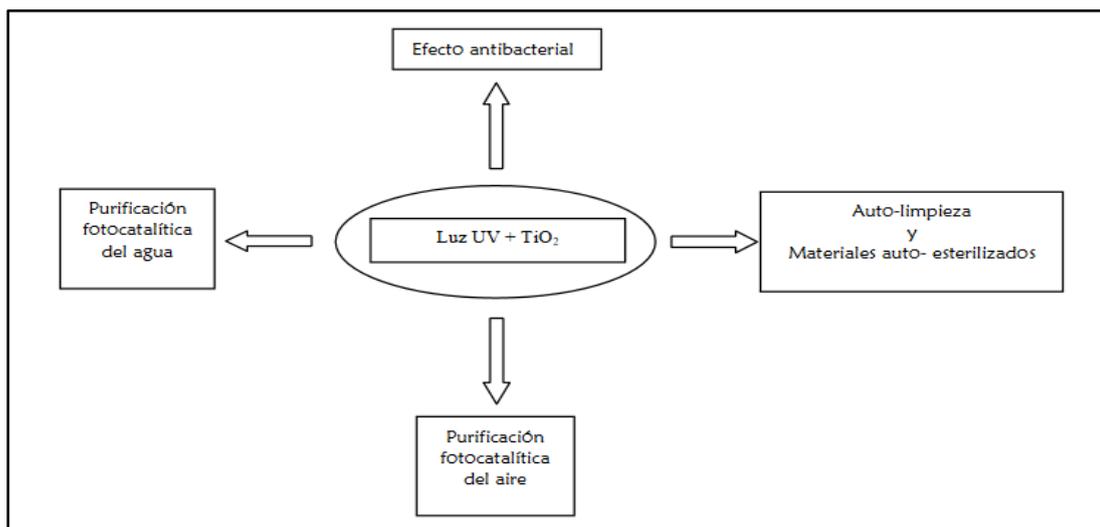
El dióxido de titanio puede excitarse en medios acuoso y aplicando luz solar permanente, con la energía suficiente para realizar un salto energético, entonces los electrones saltan de la banda de valencia a la banda de conducción provocando un hueco en la banda de valencia, obteniendo los llamados pares hueco electrón (h⁺ -e), para excitar el

dióxido de titanio se necesita una energía equivalente a de 3.2 voltios, solo puede absorber la luz ultravioleta en el rango de ($\lambda < 385 \text{ nm}$). Los pares huecos electrón pueden moverse a la superficie de catalizador o también recombinarse, produciendo los pares ($h^+ - e^-$), es muy importante que exista un oxidante que pueda actuar como receptor de electrones; usualmente lo desempeña el (O₂) produciéndose el ion superóxido (O₂⁻). Así mismo, las moléculas de agua van hacer absorbidas en los huecos generando radicales hidroxilos (Escuadra, et al. 2015).

Para utilizar un catalizador como el dióxido de titanio (TiO₂), se debe tener en cuenta la morfología del polvo de TiO₂, el tamaño de partícula, la distribución de tamaño, la composición de fases y la porosidad (Wang, et al., 2006; Nad, et al., 2003; Kim, et al., 2008; Dalton, et al., 2002), en la actividad fotocatalítica la cristalinidad es uno de los factores clave (Jung, et al., 2004). (Hernández, 2012).

Algunas de las aplicaciones más importantes del TiO₂, se muestran en la figura 1.

Figura 4.
Aplicaciones fotocatalíticas del TiO₂



Fuente: Hashimoto et al., 2005

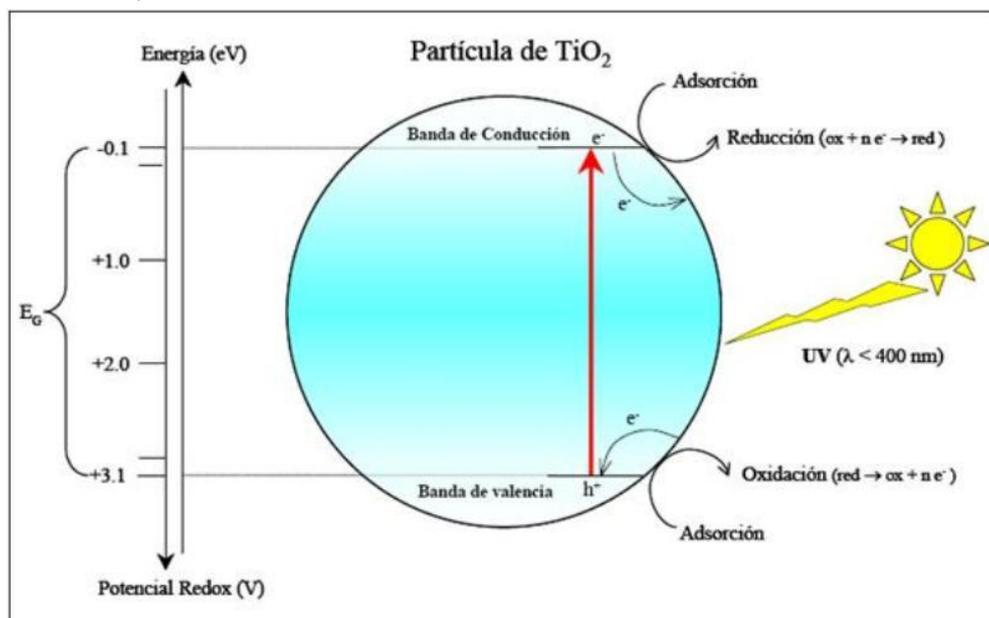
Definiremos los términos utilizados en nuestra investigación para tener un concepto

más claro de cada uno de ellos.

Castañeda, León, y Robles (2018), mencionan que las nanopartículas son un grupo de ciencias encargadas del estudio, diseño y manipulación de la materia a escala manométrica y hacen uso de estas propiedades para el tratamiento y descontaminación del agua, que se le atribuye diferentes usos como son: remediación, remoción de metales pesados, detección de contaminantes, filtración y desalinización.

La fotocatalisis heterogénea es una de las alternativas de solución en el tratamiento de aguas contaminadas y que presenten un contenido de metales pesados, es un método muy eficiente y uno de los fotocatalizadores más baratos y utilizados por su gran eficiencia fotocatalítica se basa principalmente en la luz solar (Villa, Gordillo, y Zarate, 2020).

Figura 5.
Mecanismo foto inducida de dióxido de titanio.



Fuente: Albarracín, 2014

Existen muchos métodos de activación de fotocatalisis empleando la luz solar como fuente de energía que dan un gran acceso a distintas transformaciones químicas, el más representante es el método de activación que en pocas palabras es la transferencia de electrones o a través de un fotocatalizador en excitación por la luz solar, formando aniones o cationes radiales, en algunos, el grupo saliente se extrae para producir un radical libre que conduce una reacción adicional de radicales libres. A este proceso se llama como catálisis fotoredox. Los radicales pueden ser generados mediante indicadores térmicos, que, por teoría, un fotocatalizador puede ser considerado como un iniciador de radicales. (Martínez y Leyre, 2018)

El método de fotocatalisis heterogénea forma parte de procesos llamados oxidación avanzada, esta tecnología de tratamiento se usa para eliminar muchos contaminantes orgánicos e inorgánicos presentes en el agua, es de bajo coste y amigable con el medioambiente. Estos procesos son una solución sostenible y amigable con el medio ambiente, se ha evidenciado que estas tecnologías de química verde son las más prometedoras (Borges et al., 2008; Rammohan y Nadagouda., 2013).

Esta tecnología se basa en la remoción de contaminantes que se encuentran en aguas contaminadas por distintas actividades mediante reacciones que se producen en superficies fotocatalíticas activadas por luz UV natural o artificial que genera longitudes de onda determinadas (Borges et al., 2016). para la eliminación de contaminantes en aguas contaminadas se producen reacciones catalíticas impulsadas la adición de luz sobre la superficie de materiales semiconductores (fotocatalizadores). De esta forma, la Fotocatálisis puede degradar, incluso mineralizar, diversos compuestos orgánicos según la siguiente reacción (Gutiérrez, 2021):

Fotocatalizador

Contaminante + O₂> CO₂ + H₂O + ácidos minerales

Luz solar

Los compuestos necesarios para una reacción fotocatalítica suceda son: un compuesto a degradar y oxidante como el más común el oxígeno, un espacio donde se pueda generar una reacción, como es la propia agua contaminada, los fotocatalizadores como el TiO₂, fuentes de luz UV constante ya sean naturales (luz solar) o artificiales (lámparas) que produzcan luz ultra violeta. (Sierra, R.M., 2017).

El fotocatalizador, que se usa en el fotocátalisis heterogénea es generalmente un semiconductor que tenga una banda ancha y que pueda absorber de forma directa o indirecta energía solar UV o energía ultravioleta generada por fuentes externas, éste en su estado de excitación actúa como catalizador sin que se produzcan cambios químicos en la interfase entre la disolución y el fotocatalizador excitado para que se produzcan las llamadas reacciones de descomposición de los contaminantes orgánicos e inorgánicos. (Borges et al., 2016).

También se debería tomar en cuenta que los drenajes ácidos de mina son hallados muchas veces en los pasivos ambientales mineros (PAM) y continúan dañando al medio ambiente al no ser remediados. La Dirección General de Minería (DGM) esta entidad es la responsable de actualizar el listado de pasivos ambientales en la región. Según el último listado de PAM, que ha sido publicado en agosto del 2020, se ha podido identificar, 7956 PAM; en todo el país, por otro lado 4831 PAM se encuentran en abandono (que muestra un 60,7% del total de PAM). De la cantidad final un, 391 PAM (que da a conocer 8,1%) se le atribuye una estimación de riesgo "Alto" y "Muy Alto" esta estimación es perjudicial para el medio ambiente. (Castillo, et al. 2021).

Tabla 3.

Cantidad de PAM de “muy alto” riesgo por regiones: Gestionados vs sin gestionar

Fuente: Ministerio de Energía y Minas, 2020.

Podemos decir que Lima, Huancavelica y Áncash son las zonas con mayor número de PAM, no gestionadas calificadas como de riesgo de “Muy Alto” y “Alto”. Las regiones que tienen mayor número de PAM (subtipos de desmontes de minería y relaves) son Lima, Huancavelica, Áncash, La Libertad y Pasco (Castillo, et al. 2021).

Tabla 4.

Regiones que tienen PAM sin gestionar (relaves y desmonte) de riesgo “muy alto” y “alto”

Región	Sin gestionar	Gestionados	Total	%
Ancash	25	29	54	46
Huancavelica	14	7	21	67
Lima	8	14	22	36
La Libertad	7	2	9	78
Pasco	6	9	15	40
Cajamarca	3	29	32	9
Junín	3	19	22	14
Arequipa	2	0	2	100
Apurímac	1	1	2	50
Cusco	1	0	1	100
Huánuco	1	0	1	100
Ica	1	0	1	100
Puno	0	6	6	-
Total	72	116	188	38
%	38	62	-	-

Regiones	Subtipo de PAM	Riesgo alto	Riesgo muy alto	Total
Áncash	Desmonte de mina	31	8	39
	Relaves	3	7	10
Huancavelica	Desmonte de mina	11	1	12
	Relaves	2	0	2
Lima	Desmonte de mina	11	0	11
	Relaves	3	4	7
La Libertad	Desmonte de mina	6	0	6
	Relaves	8	3	11
Pasco	Desmonte de mina	2	0	2
	Relaves	5	0	5
Total	-	82	23	105

Fuente: Ministerio de Energía y Minas, 2020.

En este sentido, se están restaurando 39.57%, que representa 3125 PAM, del número total de PAM de los cuales 1190 PAM pertenecen a proyectos de remediación implementado por el gobierno de los cuales 1936 PAM están en proceso de restauración por empresas privadas. Entre el periodo del 2012 al 2016, el MINEM, aprobó resoluciones ministeriales, autorizando a la empresa Activos Mineros SAC (AMSAC) para remediar PAM que la unidad minera tenía por prioritarias y de interés social, incluidas aquellas calificadas por “Muy alto” y “Alto” riesgo. Esta restauración se lleva a cabo por proyectos de inversión del estado (Castillo, et al. 2021).

La justificación de la presente investigación está en base a los límites máximos permisibles (LPM) que tiene gran importancia a fin de preservar el medio ambiente en entornos a unidades mineras artesanales como mecánicas que están en funcionamiento o que hayan cerrado, debido a que han dejado efluentes de drenajes ácidos, se ha buscado diferentes técnicas para la remoción de los metales pesados que podrían variar la estabilidad de los recursos naturales, por ello se propone esta nueva tecnología ya que no se conoce y no ha sido aplicada a gran escala en el Perú, y podría ser utilizada como un tratamiento de gran viabilidad para la degradación de metales pesados con la aplicación de nanopartículas mediante fotocátalisis heterogénea que ha demostrado ser viable y que aporta una gran contribución para las industrias mineras ya que estas han demostrado por sus actividades generar la mayor cantidad de efluentes ácidos producto de la exposición de los minerales. Para el caso del As la concentración de 13.52mg/l bajo a 3.164mg/l utilizando el 15% de TiO₂, lo que daría como resultado la remoción de ese metal al 77%. Este tratamiento no es muy costoso y puede servir para nuevas investigaciones que favorezcan al desarrollo y aplicación de modernas tecnologías sostenibles para los procesos de tratamiento de aguas acidas de drenajes mineros.

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

De acuerdo a nuestro enfoque, este estudio es cuantitativo ya que se utilizaron cantidades en base a herramientas informáticas, estadísticas y matemáticas, para tabular o graficar los resultados obtenidos de las muestras, es de tipo aplicada “cuando está orientada a poder adquirir nuevos conocimientos que puedan dar soluciones a los problemas prácticos que se puedan presentar” (Alvarez, 2020). De acuerdo con lo citado esta investigación es de tipo aplicada porque se usarán nuevas tecnologías para la remoción de metales pesados de drenajes mineros que contengan hierro, cobre, plomo, zinc, arsénico, buscando adquirir nuevos conocimientos.

Esta investigación es prospectiva porque tiene miras hacia el futuro, ya que a través de métodos científicos se podrá realizar el análisis de las muestras y poder prevenir una posible contaminación a gran escala en los próximos años de las aguas y el suelo.

Siendo el estudio es transversal ya que la muestra se recoge en un punto específico en el tiempo y las variables pueden cambiar de acuerdo con las condiciones que presente el efluente y puedan cambiar con el pasar del tiempo.

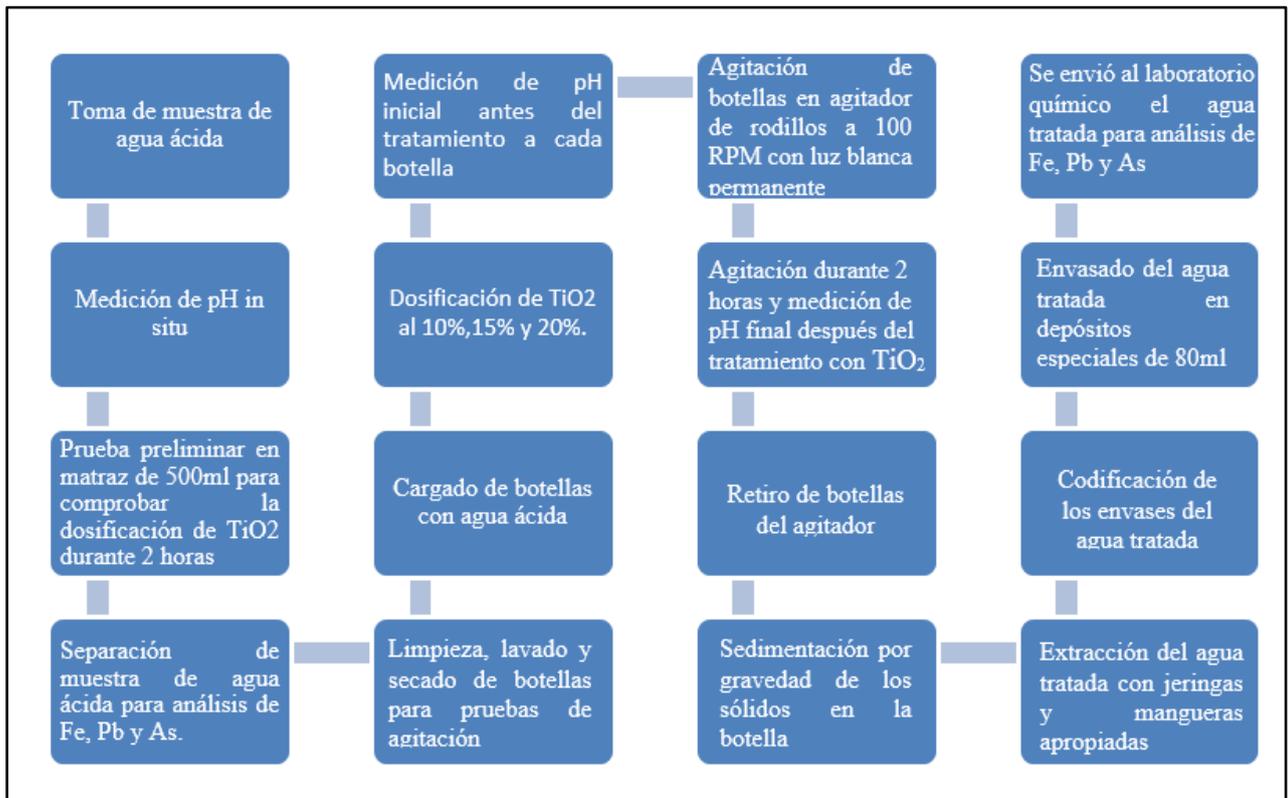
Un diseño es un estudio que obtiene datos mediante la realización de experimentos sobre diferentes procesos comparando variables para poder determinar las causas y/o efectos de los fenómenos que puedan estar orientados a resolver problemas que se presenten en la vida cotidiana según (Vargas Cordero , 2009). Siendo el diseño no experimental, debido a que se realizó a nivel de laboratorio y no se cambió en el lugar de estudio, pues la aplicación de nanopartículas mediante fotocatalisis heterogénea generará cambios en este drenaje ácido de la mina artesanal san Nicolás - El Tingo al remover los metales pesados, es a nivel de

laboratorio, las muestras recolectadas en campo son analizadas y se procesaron mediante el método de fotocátalisis heterogénea en laboratorio.

En la figura 5, se mostrarán los 16 pasos de nuestro diseño experimental para lograr los resultados de la presente investigación.

Figura 6.

Diseño experimental del tratamiento de la muestra de agua ácida con TiO₂.



Nota: Datos de la investigación, 2022.

La variable independiente es “fotocatálisis heterogénea” pues este tratamiento es el que se aplicará a través del TiO₂ para lograr la degradación de metales pesados de dicho drenaje.

La variable dependiente es “remoción de metales pesados del drenaje ácido” de la mina artesanal San Nicolas-El Tingo, porque es el resultado que se espera tener a través de la aplicación del tratamiento.

Ambas variables tanto la independiente y la dependiente son numéricas, puesto que se especificará la cantidad del TiO₂ como fotocatalizador, y también se determinará en

porcentaje la cantidad removida de cada uno de los metales que se encuentren en altas concentraciones y puedan haber sido removidos en un porcentaje significativo.

La población de investigación es: El drenaje ácido de la mina artesanal el Tingo-Cajamarca.

Para la muestra de la presente investigación se tomará 20 litros de agua del drenaje ácido de la mina artesanal el Tingo-Cajamarca, volumen calculado en función de las pruebas de laboratorio.

Los materiales que fueron utilizados son: Laptop, GPS, pH-metro, cámara fotográfica, lapiceros, baldes milimétricos.

Las técnicas e instrumento utilizados para la obtención de datos son los siguientes: La primera técnica es la observación directa en campo, para el reconocimiento del área dónde se pueda evidenciar la presencia del drenaje ácido de la mina, el cual produce daños ambientales y contaminación, luego se procedió a tomar las coordenadas in situ de los lugares en donde se sacaron las muestras utilizando un GPS Garmin. Antes de tomar la muestra se realizó la medición del pH, utilizando un pH-metro de la marca Hanna, con la certificación de la ISO 7027 para verificar el nivel de ácidos del drenaje.

La otra técnica es el análisis documental en el cual se investigó los trabajos previos con relación a la fotocatalisis heterogénea para la remoción de metales pesados y los diferentes métodos que se podrían utilizar, así mismo se revisaron los repositorios de universidades, revistas y bibliotecas virtuales, con la información recolectada de antecedentes que puedan servir de base para el trabajo de investigación, también se verificó las tablas de la normativa vigente de LMP'S, utilizando los parámetros, como medio de comparación con los resultados de los análisis obtenidos del laboratorio antes y después del tratamiento.

LMP'S para la descarga de efluentes líquidos de actividades mineras

Parámetros	Unidad	Límite en cualquier momento	Límite para el promedio anual
pH		6 a 9	6 a 9
Sólidos totales en suspensión	mg/l	50	25
Aceites y grasas	mg/l	20	16
Cianuro total	mg/l	1	0.8
Arsénico total	mg/l	0.1	0.08
Cadmio total	mg/l	0.05	0.04
Cromo Hexavalente	mg/l	0.1	0.08
Cobre total	mg/l	0.5	0.4
Hierro (Disuelto)	mg/l	2	1.6
Plomo Total	mg/l	0.2	0.16
Mercurio Total	mg/l	0.002	0.0016
Zinc Total	mg/l	1.5	1.2

Elaboración propia. Fuente: D.S. N°010-2010-MINAM

Los instrumentos para la recolección de datos son: Instrumento 01: Reporte de resultados del análisis químico de la cabeza del agua ácida, que se pueden ver en la tabla 7.

La técnica instrumental utilizada (metrología) para los análisis de la muestra se llevó a un laboratorio de análisis químico por volumetría más espectrometría de masas para realizar las pruebas experimentales, el laboratorio cumplió con la norma de análisis químico en el agua ASTM 1193:2001, estando certificado con el ISO 17305, así mismo cada prueba debe hacerse por triplicado. Se utilizó una balanza analítica para el pesado con exactitud de las nanopartículas, cumpliendo con las normas ISO 9001.

Los datos recolectados de las dos muestras tomadas se llevaron al laboratorio químico metalúrgico Polimetales, ubicado en Trujillo, donde se pudo medir nuevamente el pH confirmando que el pH es de 2 y se analizó la concentración de metales; estos resultados sirvieron para realizar un análisis comparativo de la primera muestra y después de haber aplicado la fotocatalisis heterogénea con diferentes concentraciones de dióxido de Titanio al 10%, 15% y 20%. Para los 3 procesos, el tiempo de agitación fue 1 hora para cada uno.

El procedimiento de esta investigación se realizó en tres etapas secuenciales. En

primer lugar, la muestra se obtuvo de la región de Cajamarca en Perú, para lo cual se visitó una región abandonada por una mina informal que sigue generando agua ácida y es un peligro por su corta distancia con un cuerpo de agua que alimenta a las poblaciones cercanas. Durante esta etapa se registró las principales características del DAM en términos de propiedades fisicoquímicas, registro fotográfico y registro de coordenadas, utilizando la aplicación UTM Geo Map de Android. La medición del pH in situ se realizó con un papel pHmetro del rango 0 a 14. Se realizaron dos visitas donde se tomaron dos muestras de 20 litros. En la primera visita, la muestra fue enviada al laboratorio Polimetales en la ciudad de Trujillo para poder realizar el análisis químico y poder realizar pruebas en laboratorio de fotocatalisis. En el análisis químico inicial se consideró los elementos hierro (Fe), Plomo (Pb) y arsénico (As). Los metales disueltos fueron analizados mediante volumetría y espectrometría de masas.

En la segunda etapa, se inician las pruebas exploratorias para comprobar el mecanismo de fotocatalisis en la precipitación de metales. Se puso en contacto volúmenes de 300 ml de DAM con altas concentraciones de óxido de titanio (TiO₂) al (10, 15 y 20%), de la marca Tronox E-171.

La agitación se realizó dentro de botellas de vidrio y con acceso parcial a la luz solar. La agitación duró 60 minutos, a una velocidad de 60 rpm. Se registraron los valores de pH antes y después de la agitación. Al finalizar, la solución se filtró y se envió a análisis químico por el mismo método químico que la caracterización de la muestra DAM. Solo se analizaron iones disueltos en la solución.

Luego de recibir los resultados químicos de la etapa 2, en la etapa final se realizó una segunda visita para obtener una muestra fresca, y se probó la fotocatalisis heterogénea, agregando una fuente de luz UV al experimento, y permitiendo su contacto con el oxígeno. Las pruebas fueron realizadas en la ciudad de Cajamarca donde se acondicionó un agitador

vibratorio y vasos de precipitado de 1 litro de capacidad, expuesto al aire libre de la atmosfera dentro de una caja forrada con papel aluminio, abierta en la parte superior (Ver Anexos, Foto 17). Dentro de la caja se instalaron 2 fuentes de luz ultravioleta de 40 watts.

Las condiciones de agitación fueron realizadas con volúmenes de 1 litro y una concentración de TiO₂ que varió en la escala de 1%, 5% y 10%. Antes y después del proceso se midió el pH con un electrodo de medición. Luego de la agitación, las soluciones fueron decantadas, y se enviaron para realizar el análisis químico en el laboratorio SGS en la ciudad de Lima. Además del arsénico, se tomaron lecturas de 48 metales disueltos adicionales, para un estudio detallado de los resultados. Los detalles de las principales condiciones experimentales están resumidos en la Tabla 6.

Tabla 6.

Diseño experimental

Condición	Concentración TiO ₂	Tiempo de agitación	Luz
1A	10%	60 minutos	Solar
1B	15%	60 minutos	Solar
1C	20%	60 minutos	Solar
2A	1%	60 minutos	Ultravioleta
2B	5%	60 minutos	Ultravioleta
2C	10%	60 minutos	Ultravioleta

Nota: (Datos de la investigación, 2022).

Para realizar el análisis de los datos, a los resultados obtenidos, se pudo tabular para ser interpretados en tablas, y luego se realizaron gráficos estadísticos, utilizando el software Microsoft Excel, para distinguir e interpretar los resultados obtenidos de las muestras enviadas.

Tabla 7.

Datos que serán de utilidad para comparar las muestras

Código de muestra	pH	Concentración de metales antes del tratamiento	Concentración de metales después del tratamiento	Tiempo de agitación	Dosificación de TiO ₂ en g.
-------------------	----	--	--	---------------------	--

Nota: Datos de la investigación, 2022

La presente investigación tendrá por aspectos éticos a diferentes formatos establecidos por la Universidad Privada del Norte, cumpliendo las normativas para reservar los derechos de autor y coautores como las citas respectivas para cada hallazgo informativo rigiéndose mediante el uso del manual de redacción APA. No se requirió de algún permiso ya que la mina se encuentra abandonada como un pasivo ambiental minero.

Este estudio puede no solo ser aplicado en lo que fue la mina artesanal el Tingo, sino ser replicado en diferentes minas, ya que los resultados serán compartidos para futuras investigaciones.

CAPÍTULO III. RESULTADOS

En las figuras 6 y 7, es el lugar donde la muestra fue tomada de una mina artesanal abandonada, ubicada en Cajamarca provincia de Hualgayoc, distrito El Tingo. Esta zona incluye obras mineras abandonadas como galerías, subniveles, chimeneas, cruces y nichos en una extensión de 64 hectáreas. Por referencia de los pobladores, la mina en cuestión produjo oro y plata durante 22 años, y las operaciones cerraron el 2016 debido a la migración de los minerales oxidados a sulfuros (enargita, covelita, tetraedrita, pirargirita, proustita), y a que la empresa no pudo financiar la construcción de una planta de procesamiento adecuada para su nuevo mineral. Esto es común en la minería peruana tanto artesanal como informal, y aunque es obligatorio un plan de cierre de mina, las empresas artesanales e informales no lo ejecutan a cabalidad, por lo que quedan expuestos pasivos ambientales sin tratamiento alguno.

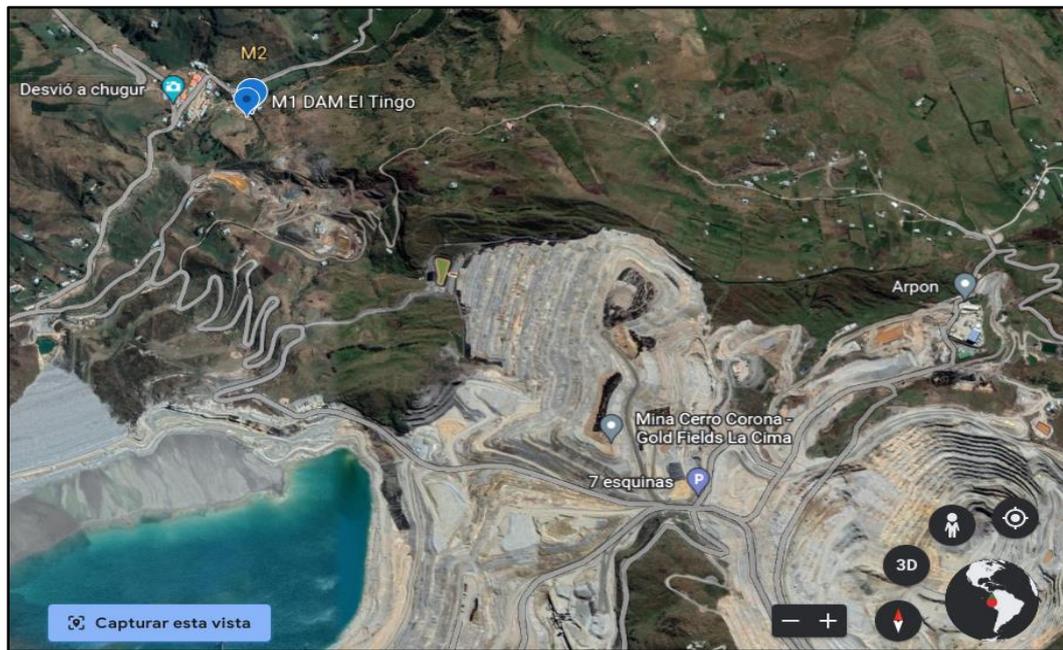
Figura 7.
Ubicación geográfica de la mina artesanal el Tingo



Fuente: (Geocatmin, 2022).

Figura 8.

Ubicación de la M1 y M2 para las pruebas de laboratorio



Fuente: (Google Earth,2022).

Tabla 8.

Valores del DAM medidos in situ

Parámetro	Unidad	Límite promedio anual (ríos y flujos de agua)	Valor medido
pH	-	6 - 9	2 - 3
Arsénico	mg/L	0.08 (total)	13.52 (disuelto)
Hierro	mg/L	1.6 (disuelto)	37.6 (disuelto)
Plomo	mg/L	0.16 (total)	0.1 (disuelto)

Nota: (Datos de la investigación, 2022).

El depósito geológico contiene minerales sulfurados como pirita y arsenopirita, que produce DAM, y que continuamente se dirige hacia el río Hualgayoc, un importante cuerpo de agua en la región, que está a menos de 100 metros de distancia. Durante la visita, se pudo evidenciar que esta instalación se encuentra en total abandono con diferentes afectaciones que ocasionarían derrumbes en la tubería principal de acceso a la entrada de la mina. El agua ácida presenta un color rojizo con sedimentos verdosos que emergen de la boca de mina. Se estimó un caudal de 10 litros por segundo a la fecha del muestreo. La muestra fue enviada a laboratorio Polimetales en la ciudad de Trujillo donde se cuantificó el contenido de metales, presentados en la Tabla 8.

Para poder medir la degradación de los metales pesados después del tratamiento aplicando nanopartículas de TiO₂ mediante fotocatalisis heterogénea en el drenaje ácido de la mina artesanal el Tingo, se tomó dos muestras, a las cuales se les agregaría dióxido de titanio (TiO₂), que funcionaría como catalizador al 10% (30g.), 15% (45g.) y 20% (50g.) el cual se agregó en 300 ml del agua de drenaje ácido, para cada porcentaje de TiO₂, pasando luego analizarse por el método de absorción atómica, 80 ml de la muestra para cada porcentaje utilizado, al dar resultados muy similares en la concentración de metales se presentaran solo los resultados de la M1 que se pueden ver en la Tabla 9, posteriormente se realiza una comparación de las características fisicoquímicas de los metales encontrados en la muestra N°1 y los LMP’S según el D.S. N°010-2010-MINAM como se puede observar en la tabla 10.

Tabla 9.

Resultados de la M1 antes y después del tratamiento con TiO₂

MUESTRA	DESCRIPCIÓN	Fe mg/l	Pb mg/l	As mg/l
HC-1	CABEZA	37.56	0.134	13.52
HT-1	10 % TiO ₂	37.14	0.119	5.155
HT-2	15 % TiO ₂	36.98	0.139	3.164
HT-3	20 % TiO ₂	36.82	0.195	3.578

Fuente: (Laboratorio químico metalúrgico Polimetales, 2022).

En la tabla 9, se describe HC-1 como la muestra de cabeza, es decir, la muestra antes del tratamiento con dióxido de titanio y las concentraciones de metales hallados en esta muestra de agua de drenaje ácido, como se puede comprobar para el Fe, al 15% de TiO₂ solo pudo remover este metal en un 2%, para el Pb, al 10% de TiO₂ se pudo remover 11%, siendo el Pb, el único metal de los analizados que se encuentra bajo el límite máximo permisible, para el As, al 15% de TiO₂ se logró remover 77% de este metal, sin embargo aún se encuentra encima de los límites máximos permisibles.

En la Tabla 10, se detalla las características fisicoquímicas de la muestra N° 01 de las aguas de drenajes ácidos de la mina artesanal El Tingo antes del tratamiento.

Tabla 10.

Análisis comparativo de la Muestra N° 01 y LMP'S.

Nota. Datos de la investigación,2022.

De la tabla 10, se puede inferir que el único metal, que se encuentra bajo el límite máximo permisible es el Pb, ya que su concentración inicial es baja y no se muestra una remoción considerable para aplicar el método, los demás metales están por encima de dicho límite, pero se muestra una remoción significativa en arsénico.

En la tabla 11, se puede observar las características fisicoquímicas de la muestra N° 01 de las aguas del drenaje minero después de aplicar la nanotecnología mediante fotocatalisis heterogénea, con el catalizador dióxido de titanio al 10%.

Tabla 11.

Análisis comparativo de la Muestra N° 01 al aplicarse TiO₂ al 10% y LMP'S.

Nota. Datos de la investigación,2022.

De la tabla 11, se puede notar que el pH subió a 4, después de aplicar TiO₂ al 10%, sin embargo, lo mínimo aceptable es de 6, para el As al 10% de TiO₂, se pudo remover el

62% de este	N° Metales	Muestra 01	Descarga de efluentes mineros LMP
	Unidades	(mg/L)	(mg/L)
	pH	2.00	6.00 a 9.00
	Arsénico	13.52	0.1
	Hierro	37.56	2
	Plomo	0.134	0.2

metal, para el Fe al 10% de TiO₂, se pudo remover 1%, para el Pb, al 10% de TiO₂ se pudo remover 11%, siendo el Pb, el único metal de los analizados que se encontró bajo el límite máximo permisible.

En la tabla 12, se puede observar las características fisicoquímicas de la muestra N° 01 de las aguas del drenaje minero después de aplicar la nanotecnología mediante

fotocatálisis heterogénea, con el catalizador dióxido de titanio al 15%.

Tabla 12.

Análisis comparativo de la Muestra N° 01 al aplicarse TiO₂ al 15% y LMP'S.

Nota. Datos de la investigación, 2022.

De la tabla 12, se puede apreciar que el pH subió a 4, después de aplicar TiO₂ al 15%, sin embargo, lo mínimo aceptable es de 6, para el As al 15% de TiO₂, se pudo remover el 77% de este metal, para el Fe al 15% de TiO₂, se pudo remover 1.5%, para el Pb al 15% de

TiO ₂	N° Metales	Muestra 01	Descarga de efluentes mineros LMP
no se	Unidades	(mg/L)	(mg/L)
pudo	pH	4.00	6.00 a 9.00
	Arsénico	3.578	0.1
	Hierro	36.82	2
	Plomo	0.195	0.2

remover el Pb, ya que aumentó ligeramente con esta cantidad, de todas maneras, fue el único metal de los analizados que se encontró bajo el límite máximo permisible.

En la tabla 13 se puede observar las características fisicoquímicas de la muestra N° 01 de las aguas del drenaje minero después de aplicar la nanotecnología mediante fotocatalisis heterogénea, con el catalizador dióxido de titanio al 20%.

Tabla 13.

Análisis comparativo de la Muestra N° 01 al aplicarse TiO₂ al 20% y LMP'S.

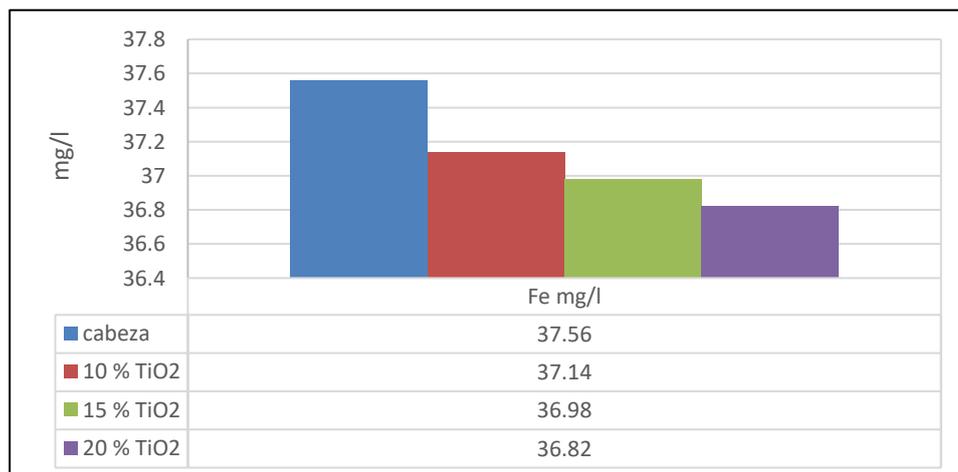
Nota. Datos de la investigación,2022.

N° Metales	Muestra 01	Descarga de efluentes mineros
Unidades	(mg/L)	LMP (mg/L)
pH	4.00	6.00 a 9.00
Arsénico	3.164	0.1
Hierro	36.98	2
Plomo	0.139	0.2

De la tabla 13, se evidencia que el pH subió a 4, después de aplicar TiO₂ al 20%, igual que paso en los otros porcentajes, sin embargo, lo mínimo aceptable es de 6, para el As al 20% de TiO₂, se pudo remover el 74% de este metal, para el Fe al 20% de TiO₂, se pudo remover 2%, para el Pb, al 20% de TiO₂ no se pudo remover el Pb, ya que aumentó un poco con esta cantidad, de todas maneras, fue el único metal de los analizados que se encontró bajo el límite máximo permisible.

Las figuras 9, 10 y 11, muestran la concentración de metales de la muestra N°1 antes y después del tratamiento con dióxido de titanio, con la comparación del límite máximo permisible.

Figura 9.
Concentración de Fe, antes y después del tratamiento con TiO₂



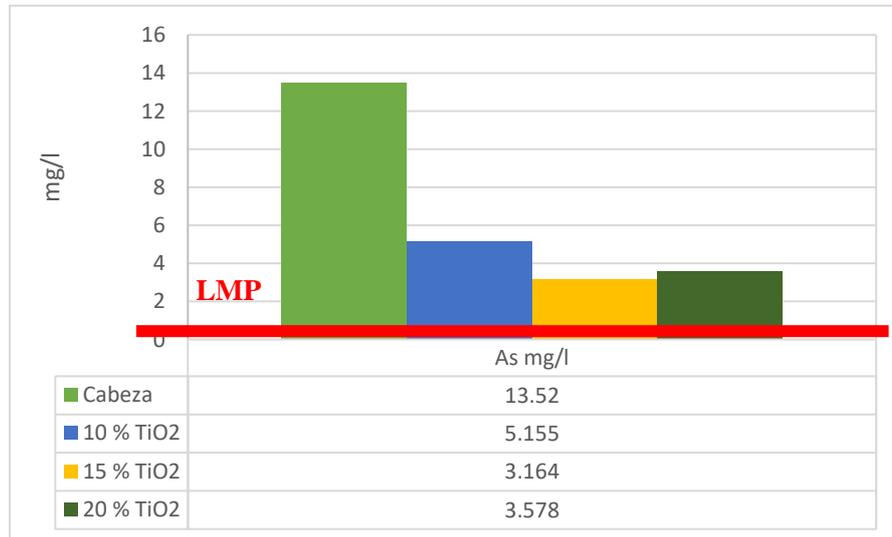
Nota. Datos de la investigación,2022.

De la figura 9, se puede apreciar que, para el Fe, al aplicar 20% de TiO₂, se pudo

remover 2%, disminuyendo un poco la concentración de Fe, en comparación con los otros porcentajes. Con respecto al límite máximo permisible se encuentra muy por encima.

Figura 10.

Concentración de As, antes y después del tratamiento con TiO₂



Nota. Datos de la investigación, 2022

De la figura 10, se puede apreciar que, para el As, al aplicar 15% de TiO₂, se pudo remover 77%, disminuyendo notoriamente la concentración de As, sin embargo, todavía no está bajo el límite máximo permisible.

Respecto a los ensayos de fotocatálisis con luz solar, las primeras pruebas de fotocatálisis se realizaron en un ambiente con luz solar parcial, tal como muestra en el Anexo N°2, fotos 11 y 16. Las muestras fueron agitadas a 3 concentraciones (10, 15 y 20%) durante un periodo de 1 hora. Los resultados muestran que el pH no ha variado manteniéndose de 2 a 3 (datos medidos con papel pHmetro), pero si se puede observar un efecto en la coloración de la solución, ya que, el color rojizo de la solución ácida se diluye con la adición del TiO₂, lo cual puede ser por un efecto de sedimentación producido por las nanopartículas, las que en la decantación arrastrarían al fondo estas partículas en suspensión. Las muestras fueron filtradas y enviadas para el análisis químico de metales disueltos.

Tabla 14

Resultados de la fotocatálisis con luz solar

Test	Fe (ppm)	As (ppm)	Fe (%R)	As (%R)
DAM	37.6	13.5	-	-
1A	37.1	5.2	1.3%	61.5%
1B	37.0	3.2	1.6%	76.3%
1C	36.8	3.6	2.1%	73.0%

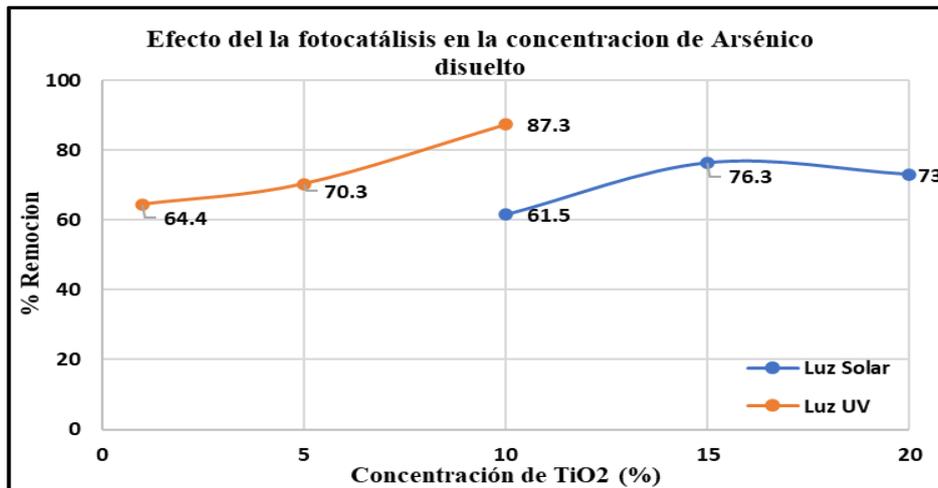
Nota. Datos de la investigación, 2022

A pesar de las condiciones ácidas de la solución y la estabilidad del arsénico (lo cual es explicado en la Figura 2); este metal si es removido hasta un 76%, lo cual indica un efecto positivo de la fotocatalisis. Debe tenerse en cuenta que la solución solo recibió la luz solar de manera parcial, ya que el material de vidrio de las botellas y el ambiente experimental, restringieron la cantidad de energía que puede ser transmitida a la solución. A pesar de tener éxito con el Arsénico, la presencia de hierro se mantuvo (% Remoción: 1.3 – 2.1%). Los resultados se resumen en la Tabla 14.

Para el ensayo de fotocatalisis UV. Se muestra el diseño de un prototipo de maqueta que simula la fotocatalisis heterogénea con luz ultravioleta usando nanopartículas de TiO₂ (Ver Anexo N°2, foto 17). Se puede evidenciar nuevamente el efecto de sedimentación de las nanopartículas, y la no variación del pH. Los resultados obtenidos de las pruebas se muestran en la Tabla 14, donde %R significa porcentaje de remoción de metales. Se observa el efecto de remoción que tiene la fotocatalisis sobre el arsénico en preferencia de otros metales. El proceso se ve beneficiado por el uso de luz UV, en comparación con la luz solar, logrando mejores resultados con una menor concentración de TiO₂ (Ver Figura 12). También se observan resultados importantes en la remoción de plomo, sin embargo, por la baja concentración de este, los resultados no son conclusivos Por otro lado, el hierro no es removido eficazmente en estas condiciones, llegando solo un 25.9%, sin embargo, esto podría mejorarse con una operación conjunta de fotocatalisis + neutralización.

Figura 11.

Resumen de resultados



Nota. Datos de la investigación,2022

Tabla 15.

Resultados con luz UV para Hierro, Arsénico y Plomo

Test	pH (1)	pH (2)	Fe ppm	Fe %R	As ppm	As %	Pb ppm	Pb %
DAM	2.7	2.6	576	-	11.8	-	0.22	-
2A	2.7	2.6	498	13.5%	4.2	64.4%	0.015	93.2%
2B	2.6	2.6	385	33.1%	3.5	70.3%	0.003	98.6%
2C	2.7	2.6	427	25.9%	1.56	87.3%	0.001	99.5%

Nota. Datos de la investigación,2022

La aplicación de este método para la remoción de otros metales (Cd, Cr, Cu, Zn, Mn), tienen un efecto menor en comparación del hierro (Fe), y arsénico (As), pero podría ser base para nuevos estudios experimentales aplicando métodos de fotocatalisis como precedente a la neutralización convencional.

Tabla 16.

Resultados de la fotocatalisis con luz UV para otros metales

Elemento	DAM ppm	2A ppm	2B ppm	2C ppm	2A %R	2B %R	2C %R
Cd (ppm)	0.610	0.579	0.54	0.509	5.0	11.5	16.6
Cr (ppm)	0.048	0.042	0.044				-
Cu (ppm)	62.2	59	55.3		5.1	11.1	-
Zn (ppm)	83.5	75.8	74.0	72.5	9.2	11.4	13.2
Mn (ppm)	72.6	65.1	69.3	69.1	10.3	4.5	4.8

Nota. Datos de la investigación,2022

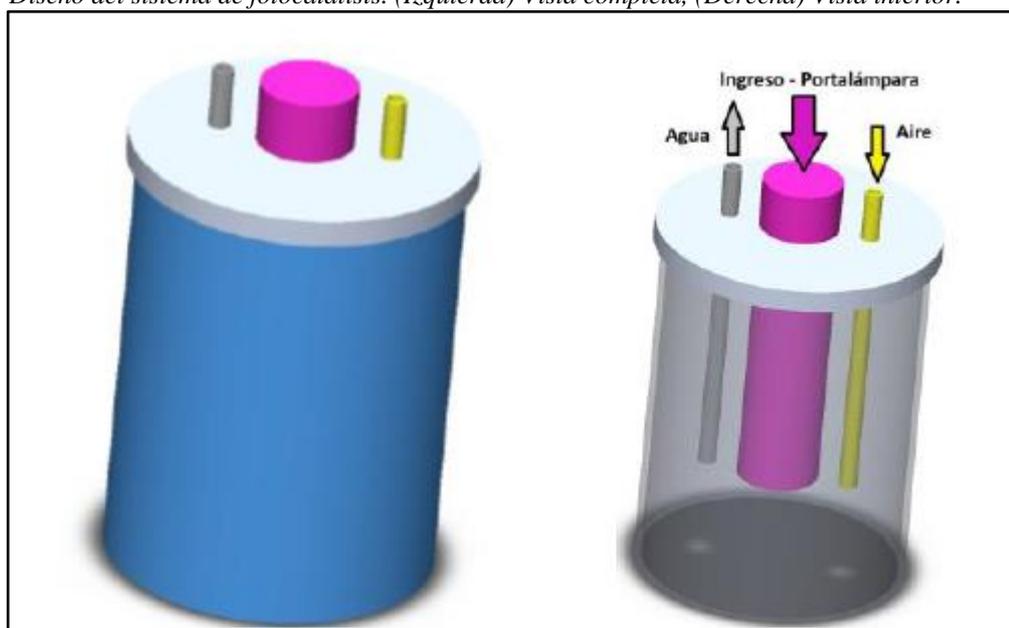
Consideraciones para trabajos futuros:

La fotocatalisis representa una tecnología factible de ser implementada a una mayor escala, no solo para agua ácida sino para otros efluentes industriales. El experimento realizado guarda cierta similitud con sistemas probados en soluciones orgánicas. A futuro, a fin de mejorar y de optimizar el procedimiento experimental, se propone la construcción de un sistema que permita suministrar la luz ultravioleta, y un medio de oxigenación a la solución a ser tratada. Después de construir virtualmente algunas alternativas, simular su estructura, empleando el software Solidworks 2022, se ha efectuado una preselección del prototipo óptimo para ser usado a nivel de laboratorio.

El resultado se muestra en la figura 13, con sus detalles constructivos y geométricos correspondientes.

Figura 12.

Diseño del sistema de fotocatalisis. (Izquierda) Vista completa, (Derecha) Vista interior.



Nota. Datos de la investigación,2022

La experimentación se continuaría realizando sobre un vaso de precipitación de vidrio pírex de 1 litro, pero en este nuevo escenario, el vaso sería instalado dentro de un sistema o coraza de aluminio tubular. El cobertor cilíndrico, cuenta con una entrada superior donde se instalaría una lámpara de luz ultravioleta, dentro de un compartimento de vidrio transparente. La coraza tiene una tapa superior con dos tuberías fijas, para permitir el ingreso de aire (color amarillo) y otro que permita un muestreo por sifoneo (color plomo), lo cual facilitaría la realización de pruebas cinéticas, sin detener la agitación. El diámetro interno y externo del sistema es estimado en 120 y 128 mm respectivamente, considerando una pared de 2 mm de espesor. La altura total es de 162 mm. Se estima un peso total de 620 gramos.

CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

A continuación, se presentan algunos antecedentes para poder ser comparados con nuestros resultados obtenidos en la presente investigación.

Según Hiyagon y Guerra (2012) indica que se calcularon la remoción en cada uno de los procedimientos con técnicas diferentes, y pudieron lograr un resultado favorable con un porcentaje de remoción de 80% al aplicar nanotecnología tratando aguas de drenajes ácidos de mina, pero para la presente investigación no se ha obtenido dicha remoción en lo referente al Pb, ya que utilizando al 10% de TiO₂ solo se removió el 11% de dicho metal. Por otro lado Granda, Hincapié, y Lopera (2018) en su artículo de investigación titulado: “Tratamiento de residuos de laboratorio vía fotocátalisis heterogénea con TiO₂” con el objetivo de determinar el porcentaje y tiempo para eliminar la coloración aguas contaminadas, y la degradación de contaminantes, dieron a conocer una alternativa para el tratamiento de aguas, y fue favorable la fotocátalisis heterogénea utilizando TiO₂, por lo que este método permite una degradación de alrededor del 70% en un periodo de dos horas dando a conocer la viabilidad para una posible implementación de este proceso. Comparándola con esta investigación en la cual se logró remover el As al 15% de TiO₂ en un 77%, por un período de 1 hora, siendo viable para ese metal, ya que ha sido en el cual se alcanzado la mayor remoción en comparación con los otros metales.

Así también, Escobal, Chuquilín, y Martínez (2018), en su tesis titulada “Influencia de la concentración de TiO₂ y tiempo de residencia, en el proceso de fotocátalisis heterogénea como sistema remoción de Fe²⁺ en aguas ácidas de mina, Cajamarca 2018”, el mejor porcentaje de remoción de iones de Fe²⁺ es usando una concentración de 15% de TiO₂, ya que hay mayor concentración de material semiconductor (TiO₂) al realizar el proceso de fotocátalisis se evidencia que hay más cantidad de electrones logrando que el proceso tenga mayor rápides a comparación de las demás pruebas con diferentes

concentraciones, obteniendo así un 74,57% de remoción, con nuestra investigación coincide que al 15% de TiO₂, se removió el 77% de As, pero difiere con el Fe, ya que al 15% de TiO₂, solo se removió 1.5% en la presente investigación.

Con respecto a la fotocatalisis heterogénea que es también lo que se aplicó en esta investigación, Moreno y Zapata (2020) en su tesis titulada “Fotocatálisis heterogénea como alternativa para tratar aguas contaminadas con metomil en el municipio de Urrao” nos da a conocer que el estudio realizado por transito en el año (2011), se realizó la implementación de un reactor parabólico para tratar un insecticida el carbilo el cual es similar al Metomil, , obteniendo un porcentaje de degradación de contaminante mayor al 70%. Valor aproximado al que obtuvimos para el As, por lo cual haciendo algunas modificaciones podemos llegar a resultados beneficiosos.

Como conclusiones, tenemos que:

Se midió la remoción de los metales pesados aplicando nanopartículas mediante fotocatalisis heterogénea en la muestra del agua del drenaje acido recolectado de la mina artesanal el Tingo, utilizando como catalizador al TiO₂. Siendo los mejores resultados para el Fe aplicar el 20% de TiO₂, con el que se pudo remover 2% de ese metal, pero igual estuvo muy por encima del límite máximo permisible, para el Pb, al 10% de TiO₂ se pudo remover 11%, siendo el Pb el único metal de los analizados que se encontró bajo el límite máximo permisible. Para el As al 15% de TiO₂, se pudo remover el 77% de este metal, siendo el porcentaje de remoción más alto, sin embargo, todavía se encuentra encima del límite máximo permisible.

Se determinaron las características fisicoquímicas de la muestra del agua de drenaje ácido de la mina artesanal El Tingo antes del tratamiento, teniendo un pH de 2, tanto al momento de recolectar la muestra, como cuando se midió en el laboratorio, y las concentraciones de Fe, Pb y As, las cuales fueron de 37.56 mg/l, 0.134 mg/l y 13.52

respectivamente.

Se determinaron las características fisicoquímicas de la muestra del agua del drenaje minero después de aplicar la nanotecnología mediante fotocátalisis heterogénea, utilizando como catalizador al TiO₂, al 10%,15% y 20%, subiendo el pH a 4, en los 3 porcentajes utilizados de TiO₂, así también hubo cambios en las concentraciones de los metales, de acuerdo a los porcentajes que ayudaron a bajar la concentración de los metales, tenemos que para el Fe al 20% de TiO₂, bajo su concentración a 36.82 mg/l, para el Pb al 10% de TiO₂ bajo su concentración a 0.119 mg/l, y para el As al 15% de TiO₂ bajo su concentración a 3.164 mg/l.

Los drenajes ácidos de minas abandonadas representan pasivos ambiental significativos. Por ejemplo, dentro del lugar de muestreo de nuestra investigación, se pudo evidenciar que estos flujos van directamente al río más próximo que se encuentra a 70 metros, lo cual pone en peligro a la población del Tingo, ya que estas personas usan el suministro de agua para riego y dar de beber a sus animales.

La fotocátalisis es una opción factible en la remoción de metales pesados de un flujo de drenaje ácido de mina, especialmente para los que no pueden ser removidos eficazmente por otros procesos, como es el Arsénico. Un sistema de fotocátalisis requiere de un alto suministro de energía por lo que la luz ultravioleta mejora la remoción de metales, especialmente del Arsénico, sin embargo, incluso en ausencia de un suministro UV, la luz solar puede ser utilizada, ya que, en adecuadas condiciones, se podría reducir hasta un 76% de Arsénico en la primera hora de agitación, en un ambiente ácido (pH entre 2 y 3). Los mejores resultados se obtuvieron con luz ultravioleta, llegando a un 87% de remoción en la primera hora de agitación, valor que puede incrementarse a escala operativa, prolongando el tiempo de reacción o considerando un efecto de recirculación. Si bien la fotocátalisis es una técnica efectiva para el arsénico, metales como el hierro o cobre necesitan etapas posteriores

de neutralización para alcanzar los límites máximos permisibles.

Las limitaciones para hacer posible este trabajo de investigación fueron poder emplear el tiempo necesario para ir a recolectar las muestras en los envases adecuados, luego conseguir un laboratorio adecuado en el cual puedan analizar las muestras recolectadas y sean datos confiables, tratar de conseguir a tiempo el dióxido de titanio que se iba a utilizar. Otra limitación que se tuvo fue no haber utilizado un modificador de pH como es la soda caustica para que el pH logre incrementarse a 6 como lo requiere el límite máximo permisible, lo cual sería como recomendación para otras investigaciones y así puedan precipitar los metales agregándole después el TiO₂ y probar en el laboratorio con el tiempo de agitación mayor de 2 a 3 horas para ver cuáles serían los resultados. Con respecto al costo de dióxido de titanio 250gr estarían costando S/. 25, mientras que 1kg de soda caustica, está costando S/. 20.30, notando que la soda caustica es más económica, por lo tanto, no habría inconveniente en utilizarla, siendo la limitante la entrega a tiempo para poder aplicar todos los materiales, ya que se compraría a través de páginas virtuales.

Como implicancia práctica se ha tenido que no se han logrado los resultados esperados con respecto a la remoción de metales pesados, salvo por el As, que si se logró la remoción al 77% de dicho metal, utilizando el 15% de TiO₂, pero aun así no está bajo el límite máximo permisible por lo cual se recomienda para otras investigaciones, que deben primero subir el pH antes de agregar el TiO₂ para obtener resultados más satisfactorios, sin embargo esta investigación incentiva a los nuevos investigadores a mejorar los procesos antes descritos, sin incurrir en el mismo error. La otra implicancia que se tendría es que, al no haber usado un precipitador de pH, este no logró subir como lo esperábamos, por lo que se podría usar cal o soda caustica, como antes se mencionaba.

REFERENCIAS

- Albarracín, F. (2014). *Estudio de la fotorrespuesta a la luz visible de nanopartículas de oro depositadas sobre óxido de Titanio [Tesis de master, Universidad Politécnica de Valencia]*. Valencia, España.
https://m.riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/47598/TFM_Ferran_Albarrac%20C3%ADn_S%20C3%A1nchez.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Alegre Zorrilla, Y. V., & Rosales Asención, S. K. (2017). *Influencia del tipo de fotocatálisis y tiempo en el tratamiento de aguas residuales textiles [Tesis de título, Universidad Nacional del Centro del Perú]*. Huancayo.
<https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/3790/Alegre%20Zorrilla-Rosales%20Asenci%20c3%b2n.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Alvarez, A. (2020). *Clasificación de las investigaciones*. Universidad de Lima.
- ATSDR. (28 de Julio de 2022). *La toxicidad del arsénico*.
https://www.atsdr.cdc.gov/es/csem/arsenic/efectos_fisiologicos.html
- Bardales Gonzales, J. O., & Cruzado Villanueva, D. (2022). *Propuesta de generación de biosólidos con aguas residuales provenientes de la mina de Carbón Piñipata para su uso en la agricultura en la provincia de Hualgayoc, 2020 [Tesis de título profesional, Universidad Privada del Norte]*. Cajamarca.
<https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/30190/Bardales%20Gonzales%20c%20Jose%20Oswaldo-Cruzado%20Villanueva%20c%20Deisy%20Mariela.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Castañeda Olvera, J. R., Leon Silva, S., & Robles Belmont, E. (2018). Panorama de la investigación y desarrollo de las nanotecnologías. *Dialnet*, 18.
<https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6543781.pdf>
- Castillo, L., Satalaya, C., Paredes, Ú., Encalada, M., Zamora, J., & Cuadros, M. (2021). *Pasivos ambientales mineros en el Perú: Resultados de la auditoría de desempeño sobre gobernanza para*

el manejo integral de los PAM. Obtenido de Documento de política en control de Gubernamental.

Contraloría General de la República del Perú:

<https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2135978/Pasivos%20ambientales%20mineros%20en%20el%20Per%C3%BA.pdf.pdf?v=1629917547>

Chacon, H. (2018). Reducción de microorganismos del agua en la zona rural de la Esperanza. *Concytec Alicia*, 350.

Chaganaqui, K., Alvarado, D., & Alarcón, H. (2019). Biosíntesis de Nano partículas de Hierro (Fe₃O₄) en la Remediación de aguas contaminadas. *Redalyc*, 10.

Chavez, G. A. (2018). Nanotecnología una alternativa para el tratamiento de aguas. *Scielo*.

Defiende la sierra. (2017). *Accidentes Mineros*. Obtenido de <http://defiendelasierra.org/accidentes-mineros/>

Escobal, L., Chuquilín, D., & Martínez, L. (2018). *Influencia de la concentración de TIO₂ y tiempo de residencia, en el proceso de fotocátalisis heterogénea como sistema remoción de Fe²⁺ en aguas ácidas de mina, Cajamarca 2018*[Tesis de bachiller, Universidad Privada del Norte]. Repositorio institucional, Cajamarca.

<https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/14156/Escobal%20D%c3%adaz%20Luis%20Gustavo%20-%20Chuquil%c3%adn%20Vallejos%20Diana%20Elizabet%20-%20Mart%c3%adnez%20Mendoza%20Luis%20Alberto.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Escuadra, S., Gómez, J., Altabás, L., Lasheras, A., Bezdicek, J., & Ormad, M. (2015). Aplicacion de nano fotocátalisis con TiO₂ como tratamiento final de agua de salida de depuradora. <https://www.aguasresiduales.info/revista/articulos/aplicacion-de-nano-fotocatalisis-con-tio2-como-tratamiento-final-de-agua-de-salida-de-depuradora>

Espinosa Rodriguez, M. A., Hidalgo Millam, A., & Delgado, R. (2016). Diseño de un sistema de tratamineto para el drenaje acido de mina. *Redalyc. org*, 20(2). <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46750928001>

Galetovic Carabantes, A., & Fernicola, N. (Diciembre de 2003). Arsénico en el agua de bebida: un

problema de salud pública. *Rev. Bras. Ciencias Farmaceuticas*, 39(4), 365–372.
doi:<https://doi.org/10.1590/S1516-93322003000400003>

Granda, C., Hincapié, G., & Lopera, S. (2018). Tratamiento de residuos de laboratorio vía fotocátalisis heterogénea con TiO₂. *Scielo*.
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-77992018000200187&lang=es

Grufides. (2015). *OEFA confirma que Yanacocha contamina con aguas ácidas a la comunidad de San José y al Río Grande*. Obtenido de <https://www.grufides.org/content/oefta-confirma-que-yanacocha-contamina-con-aguas-cidas-la-comunidad-de-san-jos-y-al-r-o>.

Guerra, A. A., & Hiyagon, G. V. (2012). Tratamiento de aguas aplicando nanotecnología. *Scielo*.
<http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/3362>

Gutiérrez, M. (2021). Fotocatálisis heterogénea para la eliminación de contaminantes emergentes de las aguas residuales. *igua*. <https://www.iagua.es/blogs/miriam-gutierrez-gonzalez/fotocatalisis-heterogenea-eliminacion-contaminantes-emergentes-aguas>

Hernandez. (2019). Efectos de Micro y Nano Burbujas en Tratamientos de Aguas Residuales Domésticas. *Scielo*.

Hernández, J. (2012). *Desarrollo de materiales nanoestructurados "dióxido de titanio dopado con oro (Au/TiO₂)", para la descomposición de monóxido de nitrógeno y metil terbutileter, en sistemas fotocatalíticos*[Tesis de doctorado, Centro de investigación en materiales avanzados]. Repositorio institucional, Chihuahua.
<https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/768/1/Javier%20Hernandez%20Fernandez%20DCM.pdf>

Hiyagon, G. V., & Guerra, A. A. (2012). Tratamiento de aguas aplicando nanotecnología. *Scielo*.
<http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/3362>

Ibhadon, A., & Fitzpatrick, P. (01 de marzo de 2013). Heterogeneous Photocatalysis: Recent Advances and Applications. *Catalysts*, 3(1), 189-218. doi:<https://doi.org/10.3390/catal3010189>

- Linares, C., & González, A. (2019). *Optimización de un sistema de filtración con nanomateriales para la mejora de los índices de calidad del agua [Tesis para título, Universidad Católica de Colombia]*. Bogotá.
<https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/23944/1/TG.%20OPTIMIZACION%20FILTRACION%20CON%20NANOMATERIALES.pdf>
- Lozana, A., & Rojas, A. (2018). Nanotecnología aplicada a remediación ambiental. *Concytec*, 78.
- Masindi, V., & et al. (2022). Challenges and avenues for acid mine drainage treatment, beneficiation, and valorisation in circular economy: A review. *183(106740)*.
- MINAM. (2010). *Gobierno del Peru, “Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM .Límites Máximos Permisibles (LMP) para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales (PTAR), para el sector Vivienda,” Sinia - Ministerio del Ambiente.*
<https://sinia.minam.gob.pe/normas/limites-maximos-permisibles-lmp-%20efluentes-plantas-tratamiento-aguas>
- Moreno Sepúlveda, X., & Zapata Muñoz, A. F. (2020). *Fotocatálisis heterogénea como alternativa para tratar aguas contaminadas con metomil en el municipio de Urrao [Tesis de título, Tecnológico de Antioquia]*. Insitución Universitaria.
<https://dspace.tdea.edu.co/bitstream/handle/tdea/1031/Fotocatalisis.pdf?sequence=1>
- Nevárez, M., Espinoza, P., Quiroz, F., & Ohtani, B. (2017). Fotocatálisis: Inicio, actualidad y perspectivas a través del TiO₂. *redalyc*, 12(2-3), 45-59.
https://www.redalyc.org/jatsRepo/933/93357608005/html/index.html#redalyc_93357608005_ref23
- Quiros Bustos, N. (2012). Aplicaciones ambientales de la nanotecnología para el tratamiento de agua. *concytec Alicia*, 116. <https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/6292/aplicaciones-ambientales-nanotecnolog%C3%ADa.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Rodríguez, F. A., Durán, J. C., Drisya, K., & Zanella, R. (09 de enero de 2023). The challenges of integrating the principles of Green Chemistry and green engineering to heterogeneous

- photocatalysis to treat water and produce green H₂. *Catalysts*, 13(1), 154. doi: <https://doi.org/10.3390/catal13010154>
- Santiago. (2012). Nanotecnología en el Perú. *Scielo*. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2012000300001
- Tapia, N., & Huanca, M. (2019). *Remoción de arsénico en agua proveniente del río Tambo sector Quelgua con nanopartículas de óxido de hierro soportadas en zeolita [Tesis de título profesional, Universidad Nacional de San Agustín]*. Repositorio institucional, Arequipa. <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/10259/IQtaafanl%26hucm.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Taylor, J., Pape, S., & Murphy, N. (2005). *A summary of passive and active treatment technologies for Acid and Metalliferous Drainage (AMD)*. https://www.earthsystems.com.au/wp-content/uploads/2012/02/AMD_Treatment_Technologies_06.pdf.
- Tejada Tovar, C., Villavona Ortiz, A., & Caceres Jaraba, L. (2014). Adsorción de metales pesados enguas residuales usando nanotecnología. *Dialnet*, 15.
- Vargas Cordero, Z. R. (2009). La investigación aplicada una forma de conocer las realidades con evidencia científica. *Redalyc.org*. <file:///C:/Users/ALEX/Downloads/538-Texto%20del%20art%C3%ADculo-848-2-10-20120803.pdf>
- Vargas, H., Jamanca, G., & Vásquez, Y. (Julio de 2023). Heterogeneous UV/TiO₂ photocatalysis applied to the removal of arsenic from acid mine drainage. 21(17-21). doi:<https://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2023.1.1.1378>
- Vega, A. (2015). *Uniandes*. Obtenido de Situación de la Nanotecnología en el Perú: <https://nanoseguridad.uniandes.edu.co/images/Presentaciones/PresentacionesPDF/AmericaLatinaCaribe/Situacion%20de%20la%20nanotecnologia%20en%20Peru.pdf#:~:text=La%20nanotecnolog%C3%ADa%20en%20Per%C3%BA%20se%20encuentra%20en%20una,los%20laboratorios%20exist>
- Villa, K., Gordillo, F., & Zarate, F. (2020). EFICIENCIA FOTOCATALÍTICA DE PELÍCULAS

MULTICAPAS TiO Ag/TiO CRECIDAS POR MEDIO DE LA TÉCNICA SOL-GEL. *Alicia Concytec.*

https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/REVUNFV_1ae0e7097618491dabb73d7a91a1ef9a

ANEXOS

ANEXO N° 1. EVIDENCIA DE LA RECOLECCIÓN DE MUESTRAS EN LA MINA ARTESANAL EL TINGO



Foto 1. Ingreso a la bocamina de la mina artesanal el Tingo



Foto 2. Recojo de la M1 para el análisis en el laboratorio



Foto 3. Toma del pH de la M1



Foto 4. Recojo de la M2 para el análisis en el laboratorio



Foto 5. Toma del pH de la M2

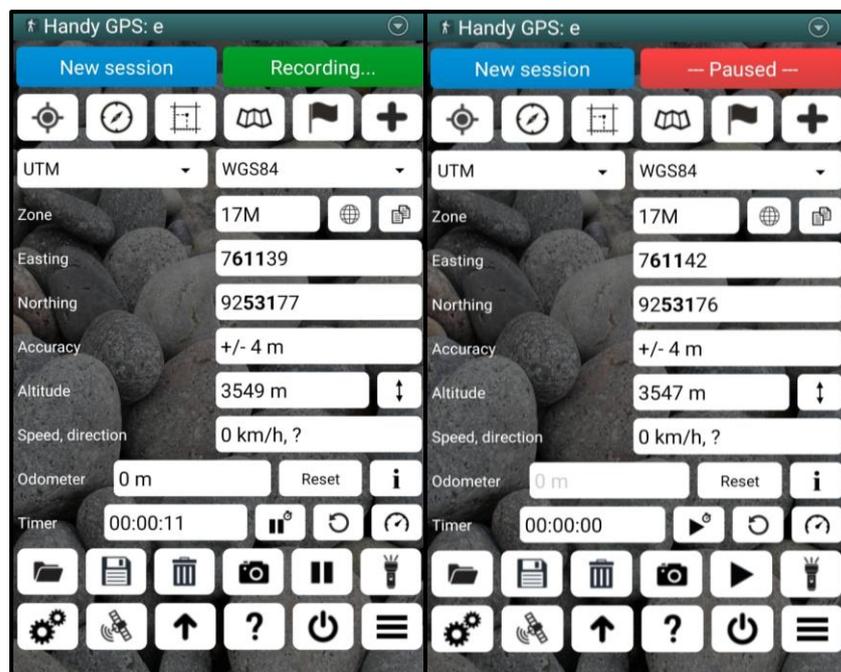


Foto 6. Ubicación en GPS, de la M1 y M2

ANEXO N° 2. ANÁLISIS EN LABORATORIO DE LAS MUESTRAS APLICANDO TiO₂



Foto 7. Dióxido de Titanio que se utilizó en las muestras



Foto 8. Medición del agua que será analizada y tratada



Foto 9. Medición del pH del agua recolectada de drenaje ácido

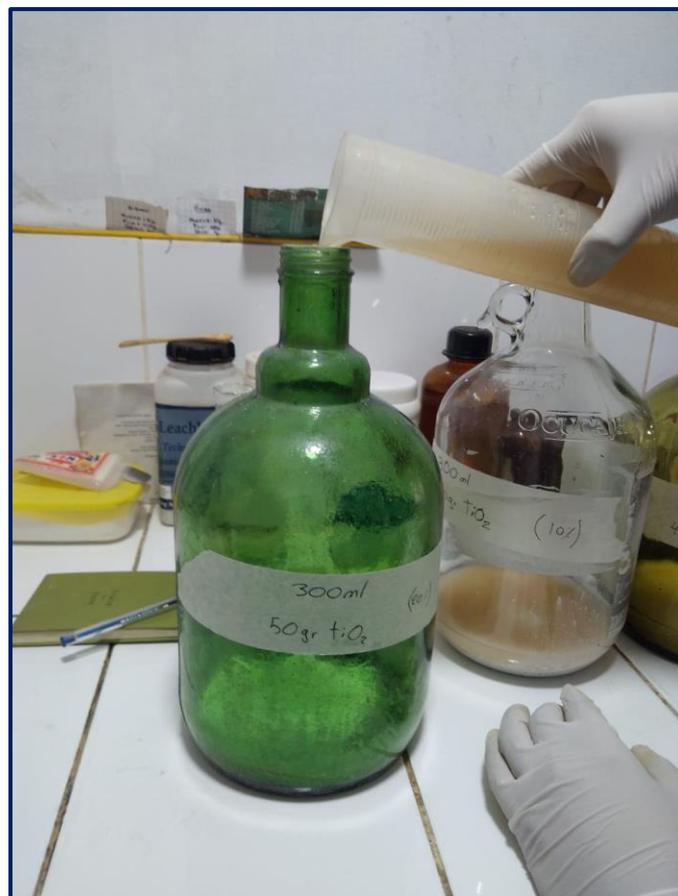


Foto 10. Vertiendo el agua de drenaje ácido para mezclar con TiO₂ al 10%,15% y 20%



Foto 11. Tiempo de agitación de 1h. con el TiO₂ añadido



Foto 12. Vertiendo después de la agitación, para analizar la muestra al 15% de TiO₂



Foto 13. Vertiendo después de la agitación, para analizar la muestra al 10% de TiO₂



Foto 14. Muestras para analizar al 10%,15% y 20% de TiO₂



Foto 15. Medición del pH, después del tratamiento con TiO₂



Foto 16. Muestras de cabeza y muestras para analizar después del tratamiento con TiO₂



Foto 17. Pruebas experimentales de fotocatalisis heterogénea UV

ANEXO N° 3. CERTIFICADO DE LABORATORIO QUÍMICO METALÚRGICO POLIMETALS



LABORATORIO QUIMICO METALURGICO

ANALISIS DE MINERALES METALICOS & NO METALICOS

INFORME DE ENSAYE N° 041122-001

DATOS DEL SOLICITANTE

A solicitud de	: HILDER VARGAS VALDEZ	Cantidad de Muestra	: 80 ml
Producto	: SOLUCION EN ESTUDIO	Fecha de Recepción	: 02/11/22
Tipo de Análisis (METODO)	: ABSORCION ATOMICA	Fecha de Ensayo	: 04/11/22
Descripción de la Muestra	: POTECITO DE PLASTICO	Fecha de Reporte	: 04/11/22

RESULTADOS

ELEMENTO	Fe	Pb	As
UNIDAD	mg/l	mg/l	mg/l
METODO	AAS	AAS	AAS
MUESTRA-HT 1	37.14	0.119	5.155
MUESTRA -HT-2	36.98	0.139	3.164
MUESTRA -HT-3	36.82	0.195	3.578
MUESTRA -HC 1	37.56	0.134	13.52

Trujillo, 04 de NOVIEMBRE de 2022

Se informa a cualquier persona que tenga en su poder este documento, que el contenido del mismo refleja los hallazgos del cliente, solo al momento de intervención y dentro de los límites de las instrucciones del cliente, cualquier modificación no autorizada, fraude o falsificación del contenido o de la apariencia de este documento es ilegal y los culpables pueden ser procesados al máximo de la ley.


 Juan Miguel Del Aguila Coriño
 ING. QUIMICO
 R. C. P. N° 188270

Mz. D lote 04 – Urb. Monserrate

Celular RPC 991739253

Trujillo - Perú