

Heterogeneous UV/TiO₂ photocatalysis applied to the removal of arsenic from acid mine drainage

Hilder Vargas, Bachiller¹, Gustavo Jamanca-Lino, Magister², Yury Vásquez, Magister³

¹Universidad Privada del Norte, Perú N00208396@upn.pe

²Universidad Privada del Norte, Perú gustavo.jamanca@upn.pe

³Universidad Nacional de Moquegua, Perú yvasquezc@unam.edu.pe

Abstract— The generation of acid mine drainage (AMD) represents one of the main challenges that mining companies must deal with daily. Despite the success of conventional methods, some elements, such as arsenic, are difficult to remove, even under highly basic conditions, so new environmental remediation methods need to be explored. This work seeks to broaden the knowledge of heterogeneous UV photocatalysis, a technique that uses nanotechnology to remove toxic compounds, and it has already been successfully tested in organic solutions and wastewater; however, its applications for acid mine water have been tiny explored in the literature. The results of experimental tests using AMD solutions obtained from the district of Hualgayoc, Cajamarca, in an environment irradiated by sunlight and ultraviolet light are summarized. They confirm an arsenic remotion greater than 87% at a pH of 2.5 under a concentration of 10% TiO₂ after one hour of agitation and irradiation with ultraviolet light. This serves as a starting point for new research that favors the development and application of sustainable technologies in the mining industry.

Keywords— Drainage acid mine, nanotechnology, environmental remediation, arsenic, heterogeneous photocatalysis.

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).

ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).

DO NOT REMOVE

Fotocatálisis heterogénea UV/TiO₂ aplicada a la remoción de arsénico de los drenajes ácidos de mina

Resumen—La generación de drenaje ácido de mina (DAM) representa uno de los principales retos con los 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. Este trabajo busca expandir el conocimiento de la fotocatalisis heterogénea UV, una técnica que usa la nanotecnología para remover compuestos tóxicos y que ya 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. Se resumen 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. Los resultados 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. Esto sirve como punto de partida para apertura nuevas investigaciones que favorezcan al desarrollo y aplicación de tecnologías sostenibles en la industria minera.

Palabras claves— Drenaje ácido de mina, nanotecnología, remediación ambiental, arsénico, fotocatalisis heterogénea.

I. INTRODUCCION

En las últimas décadas, las actividades humanas han resultado en el impacto y la contaminación de muchos ecosistemas, lo cual es un problema común en los países en vías de desarrollo. De manera específica, las actividades mineras (activas o abandonadas) producen grandes cantidades de flujos ácidos, denominados “drenaje ácido de mina”, o DAM, que son uno de los principales pasivos ambientales de alto impacto en los ambientes acuáticos (Figura 1).



Figura 1. Típico ambiente con drenaje ácido de mina en España. Créditos: Banco de Imágenes Geológicas [1]

El agua ácida es una denominación para las soluciones con un pH < 6.0 y generalmente con iones metálicos disueltos,

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

sulfatos, metaloides y elementos de tierras raras [2]. 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 [2]. 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 [2]. Las principales características fisicoquímicas del DAM se resumen en la Tabla 1.

TABLA I
PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS TÍPICAS DEL DAM [3], [4]

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

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 [5]. 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 II los eventos ambientales más significativos de los últimos 15 años.

Tabla II
PRINCIPALES EVENTOS RELACIONADOS AL DAM EN AMÉRICA EN LOS ÚLTIMOS 15 AÑOS [6], [7],[8]

Lugar	Año	Impacto ambiental
Mina Farallón.Nyrstar., México.	2009	Probable impacto a la salud de los pobladores.
Mínera Yanacocha, Cajamarca -Perú	2014	Contaminación a las comunidades de San José y al río Grande.
Minas abandonadas, sur de Arizona, EE. UU.	2014	Desborde de lodo contaminado hacia los cuerpos de agua que alimentan al Lago Patagonia
Mina abandonada Gold King, EE. UU.	2015	Fuga de agua ácida con sedimentos extendidos en 160 km

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 [5]. 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 [5]. 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.

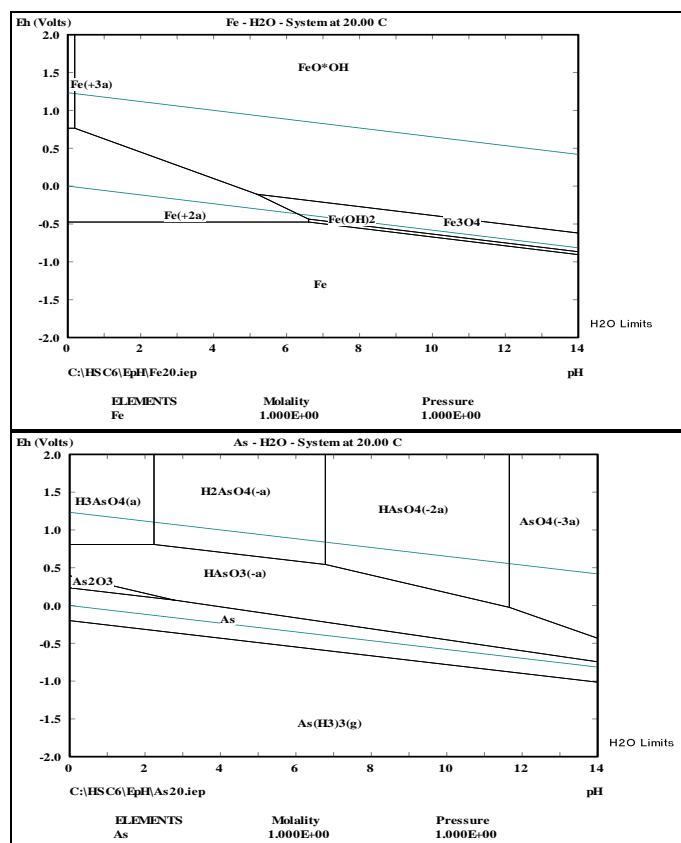


Figura 2. Diagramas Pourbaix del hierro (Fe) y arsénico (As). Calculado por los autores en el software HSC Chemistry Versión 6.0.

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) [2], que son difíciles de ser precipitados. El As-III (arsénico 3) no precipita con métodos convencionales, como se puede inferir mediante 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 [9]. 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 [10].

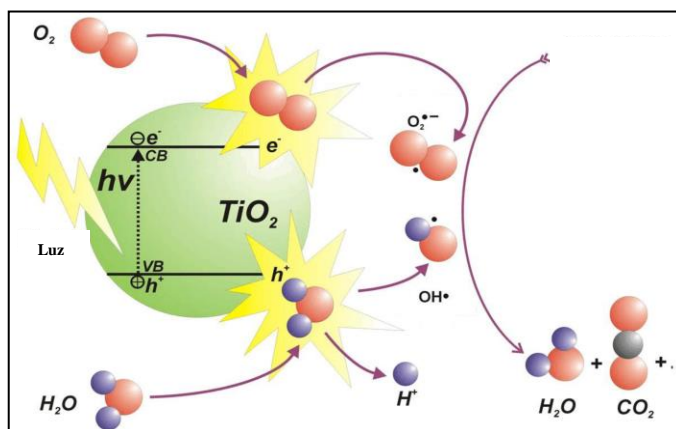


Figura 3. Mecanismo de la fotocatalisis con TiO₂. Modificado de [11]

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 [11], 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, dada su capacidad para la remoción de metales pesados como el 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, el proceso puede ser aplicado como bactericida para el consumo de agua potable, degradación de materia orgánica en soluciones ácidas [11], limpieza de sistemas de aire, remoción de pesticidas del agua, aplicaciones médicas, e incluso la producción de hidrógeno [12], [13], [14]. 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 [11]. Por otro lado, aunque la lista de nanomateriales semiconductores es larga, seleccionamos el dióxido de titanio (TiO_2), ya que es un material económico, no reactivo e incluso inocuo para el cuerpo humano en pequeñas cantidades.

II. METODOLOGIA

Esta investigación se dividió 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 el análisis químico y para las pruebas 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 (TiO_2) 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 Figura 7). 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 TiO_2 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 análisis químico al 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 III.

TABLA III.
DISEÑO EXPERIMENTAL

Condicion	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

III. RESULTADOS

A. Toma de muestra

La muestra fue tomada de una mina artesanal abandonada, ubicada en el departamento de Cajamarca provincia de Hualgayoc, distrito El Tingo (Ver Figura 4 y 5). 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. Este evento es común en la minería artesanal e informal en el Perú, 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.

TABLA IV
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)



Figura 4. Visita a la zona de generación de agua ácida. En la fotografía Hilder Vargas



Figura 5. Vista aérea obtenida mediante las aplicaciones Handy GPS y UTM Geo Map. La zona de muestreo se señala en el punto verde. La imagen de la derecha es la ampliación de la izquierda e incluye el registro de coordenadas.

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 IV.

B. Ensayos de fotocatalisis con luz solar

Las primeras pruebas de fotocatalisis se realizaron en un ambiente con luz solar parcial, tal como muestra la Figura 6. 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 pHmeter), 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 TiO_2 , 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.



Figura 6. Imágenes de las pruebas experimentales. (Izquierda) Agitación en botellas. (Derecha) Soluciones después de la fotocatalisis y filtración.

TABLA V
RESULTADOS DE LA FOTOCATALISIS 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%

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 V.

C. Ensayos 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 Figura 7). Se puede evidenciar nuevamente el efecto de sedimentación de las nanopartículas, y la no variación del pH. Los resultados de las pruebas se muestran en la Tabla V, 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 8). 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 7. Pruebas experimentales de fotocatalisis heterogénea UV

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 VII.

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

D. 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 de optimizar el procedimiento experimental, los autores proponen 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.

TABLA VI.
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%

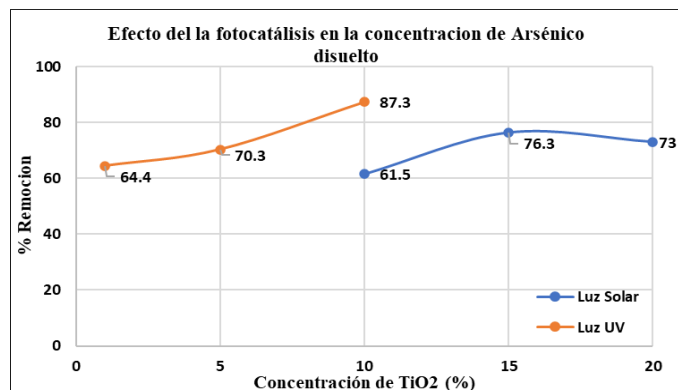


Figura 8. Resumen de resultados

La aplicación de este método para la remoción de otros metales (Cd, Cr, Cu, Zn, Mn), tienen un efecto menor en

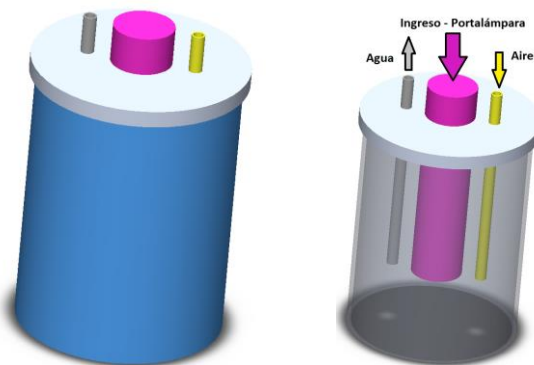


Figura 9. Diseño del sistema de fotocatalisis. (Izquierda) Vista completa, (Derecha) Vista interior. Diseñado por los autores en SolidWorks

El resultado se muestra en la figura 09, con sus detalles constructivos y geométricos correspondientes. 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.

IV. CONCLUSIONES

El drenaje ácido de mina representa un pasivo ambiental significativo. 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 fotocatalisis es una opción factible para 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 fotocatalisis 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 fotocatalisis es una técnica efectiva para el arsénico, metales como el hierro o cobre necesitan etapas posteriores de neutralización para alcanzar los límites máximos permisibles.

AGRADECIMIENTOS

Se extiende el agradecimiento a la Universidad Privada del Norte y a su Dirección de Investigación, Innovación & Responsabilidad Social, por la gestión y apoyo recibido para la participación de LACCEI 2023.

REFERENCIAS

[1] V. R. Leotaud, "New technique for rehabilitation of mine rock waste piles may prevent acid drainage," Mining.com, 23-Mar-2021. [Online]. Available: <https://www.mining.com/new-technique-for-rehabilitation-of-mine-rock-waste-piles-may-prevent-acid-drainage/>.

[2] J. Taylor, S. Pape, and N. Murphy, "A summary of passive and active treatment technologies for Acid and Metalliferous Drainage (AMD)," 2005. [Online]. Available: https://www.earthsystems.com.au/wp-content/uploads/2012/02/AMD_Treatment_Technologies_06.pdf. [Accessed: 23-Dec-2022].

[3] 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, 2010. [Online]. Available: <https://sinia.minam.gob.pe/normas/limites-maximos-permisibles-imp-efluentes-plantas-tratamiento-aguas>.

[4] D. Gallardo Martínez, N. Bruguera Amarán, J. A. Díaz Duque, and I. Cabrera Díaz, "Drenaje ácido de minas y su influencia en ecosistemas asociados al yacimiento Santa Lucía, Cuba," *rias*, pp. 67–81, 2020.

[5] V. Masindi et al., "Challenges and avenues for acid mine drainage treatment, beneficiation, and valorisation in circular economy: A review," *Ecol. Eng.*, vol. 183, no. 106740, p. 106740, 2022.

[6] Grufides, "OEFA confirma que Yanacocha contamina con aguas ácidas a la comunidad de San José y al Río Grande," Grufides, 2015. [Online]. Available: <https://grufides.org/content/oefta-confirma-que-yanacocha-contamina-con-aguas-cidas-la-comunidad-de-san-jos-y-al-r-o>.

[7] Iagua, "El accidente en una mina de oro norteamericana provoca un desastre ambiental en el río Colorado," Iagua.es. [Online]. Available: <https://www.iagua.es/blogs/salvemos-cabana/accidente-mina-oro-norteamericana-provoca-desastre-ambiental-rio-colorado>.

[8] Defiende la sierra, "Accidentes Mineros," Defiendelasierra.org, 2017. [Online]. Available: <http://defiendelasierra.org/accidentes-mineros/>.

[9] A. G. Carabantes and N. A. G. G. de Fericola, "Arsénico en el agua de bebida: un problema de salud pública," *Rev. Bras. Ciencias Farmaceuticas*, vol. 39, no. 4, pp. 365–372, 2003.

[10] "La toxicidad del arsénico," 28-Jul-2022. [Online]. Available: https://www.atsdr.cdc.gov/es/csem/arsenic/efectos_fisiologicos.html.

[11] A. Ibhaddon and P. Fitzpatrick, "Heterogeneous photocatalysis: Recent advances and applications," *Catalysts*, vol. 3, no. 1, pp. 189–218, 2013.

[12] F. Anaya-Rodríguez, J. C. Durán-Álvarez, K. T. Drisya, and R. Zanella, "The challenges of integrating the principles of Green Chemistry and green engineering to heterogeneous photocatalysis to treat water and produce green H₂," *Catalysts*, vol. 13, no. 1, p. 154, 2023.

[13] G. Ren et al., "Recent advances of photocatalytic application in water treatment: A review," *Nanomaterials (Basel)*, vol. 11, no. 7, p. 1804, 2021.

[14] S. N. Ahmed and W. Haider, "Heterogeneous photocatalysis and its potential applications in water and wastewater treatment: a review," *Nanotechnology*, vol. 29, no. 34, p. 342001, 2018.