

USO DE FOTOCATÁLISE PARA REMOÇÃO DE Fe E Cu

USE OF PHOTOCATALYSIS FOR THE REMOVAL OF Fe AND Cu

USO DE LA FOTOCATALISIS PARA LA REMOCIÓN DE Fe Y Cu

Richard Alex Contreras Canchan

Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Química & Textil, Av Tupac Amaru, 210. Rímac – Perú.

Hugo David Chirinos Collantes *

Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Ambiental, Av Tupac Amaru, 210. Rímac – Perú.

Aldo Max Delgado Acevedo

Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Química & Textil, Av Tupac Amaru, 210. Rímac – Perú.

Cesar Osorio Carrera

Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Química & Textil, Av Tupac Amaru, 210. Rímac – Perú.

**Autor correspondente*

e-mail: hchirinos@uni.edu.pe

Received 27 May 2023; received in revised form 30 June 2023; accepted 01 September 2023

RESUMO

Introdução: O avanço da indústria de mineração implica na geração de drenagem ácida, pois as operações consomem entre 2% e 4,5% da demanda de água. Além disso, estima-se que serão produzidas 50.000 toneladas de resíduos, dos quais 33% representam águas residuais armazenadas em tanques de rejeitos. Esses efluentes contêm metais pesados como Fe e Cu, representando um sério perigo para a sociedade. **Objetivo:** O objetivo deste estudo é avaliar a aplicação da fotocatalise para a remoção de Fe e Cu em águas residuais industriais. Isso envolve o controle de parâmetros do processo: dose do catalisador (TiO₂), pH e tempo (dias). **Métodos:** O método utilizado é experimental, controlando as variáveis do processo por meio de um desenho fatorial. As variáveis do processo foram monitoradas aplicando o desenho fatorial 3³, ou seja, 3 fatores com 3 níveis sem repetições. Os testes foram conduzidos sob condições com um catalisador em doses de 1,2 e 3 g/L, pH de 2,5 e 8, e um tempo de retenção de 1, 2 e 3 dias. Portanto, a combinação dos fatores resultou em 27 unidades experimentais. **Resultados e Discussão:** Para o tempo de aplicação da fotocatalise, em 2 dias houve menores concentrações de Fe e Cu, atingindo 0,02 e 0,09 ppm, respectivamente. No caso do pH, um valor de 8 resultou em menores concentrações de Fe e Cu. A dose ótima do catalisador foi de 0,5 g/L de TiO₂. A eficiência de remoção foi de 99,99% para Fe e 99,97% para Cu. Na análise de fatores, observa-se que o pH tem a maior influência na remoção de Fe e Cu, seguido pelo tempo. Também é observada uma forte interação entre as duas variáveis. **Conclusões:** Em conclusão, foi possível remover Fe e Cu por meio da aplicação de fotocatalise em águas residuais sintéticas. As condições ótimas foram: pH 8, tempo de aplicação de 2 dias, dose do catalisador (TiO₂) de 0,5 g/L e eficiência de remoção superior a 99,90%. Esses valores foram semelhantes aos relatados por outros autores.

Palavras-chave: *Processo fotocatalítico, eficiência de remoção catalítica de cobre, eficiência de remoção catalítica de ferro.*

ABSTRACT

Background: The advancement of the mining industry implies the generation of acid drainage because operations consume between 2% and 4.5% of water demand. In addition, it is estimated that 50,000 tons of waste will be produced, of which 33% represents wastewater stored in tailings tanks. These effluents contain heavy

metals such as Fe and Cu that represent a serious danger to society. **Aim:** The objective of this study is to evaluate the application of photocatalysis for the removal of Fe and Cu in industrial wastewater. This involves the control of process parameters: the catalyst dose (TiO₂), pH, and time (days). **Methods:** The method used is experimental, controlling the process variables through a factorial design. The process variables were monitored applying the 33 factorial design, that is, 3 factors with 3 levels without repetitions. The tests were conducted under conditions with a catalyst at doses of 1.2 and 3 g/L, pH of 2.5 and 8, and a retention time of 1, 2, and 3 days. Therefore, the combination of the factors resulted in 27 experimental units. **Results and Discussion:** For the photocatalysis application time, in 2 days there were fewer concentrations of Fe and Cu, reaching 0.02 and 0.09 ppm, respectively. In the case of pH, a value of 8 resulted in lower concentrations of Fe and Cu. The optimal dose of the catalyst was 0.5 g/L of TiO₂. The removal efficiency was 99.99% for Fe and 99.97% for Cu. In the factor analysis, it is observed that pH has the greatest influence on the removal of Fe and Cu, followed by the time factor. A strong interaction between the two variables is also observed. **Conclusions:** In conclusion, it was possible to remove Fe and Cu through the application of photocatalysis in synthetic wastewater. The optimal conditions were: pH 8, application time of 2 days, catalyst dose (TiO₂) 0.5 g/L, and a removal efficiency greater than 99.90%. These values were similar to those reported by other authors.

Keywords: Photocatalytic process, Copper catalytic remove efficiency, iron catalytic remove efficiency.

RESUMEN

Introducción: El avance de la industria minera implica la generación de drenajes ácidos debido a que las operaciones consumen entre el 2% y el 4,5% de la demanda hídrica. Además, se estima una producción de 50,000 toneladas de residuos, de los cuales un 33% representa aguas residuales almacenadas en tanques de relaves. Estos efluentes contienen metales pesados como Fe y Cu que representan un grave peligro para la sociedad. **Objetivo:** El objetivo de este estudio es evaluar la aplicación de fotocatalisis para la remoción de Fe y Cu en aguas residuales industriales. Esto implica el control de parámetros de proceso: la dosis del catalizador (TiO₂), pH y tiempo (días). **Métodos:** El método utilizado es experimental y controla las variables de proceso mediante un diseño factorial 33. Esto significa que se utilizaron 3 factores con 3 niveles sin repeticiones. Los ensayos se llevaron a cabo en condiciones con una dosis de catalizador de 1,2 y 3 g/L, pH de 2,5 y 8, y un tiempo de retención de 1, 2 y 3 días. La combinación de estos factores resultó en 27 unidades experimentales. **Resultados y Discusión:** Para el tiempo de aplicación de fotocatalisis, en 2 días se observaron concentraciones más bajas de Fe y Cu, llegando a 0.02 y 0.09 ppm respectivamente. En el caso del pH, un valor de 8 resultó en concentraciones más bajas de Fe y Cu. La dosis óptima del catalizador fue de 0.5 g/L de TiO₂. La eficiencia de remoción fue del 99.99% para Fe y del 99.97% para Cu. En el análisis factorial, se observa que el pH tiene la mayor influencia en la remoción de Fe y Cu, seguido por el factor tiempo. También se observa una fuerte interacción entre estas dos variables. **Conclusiones:** En conclusión, se logró remover Fe y Cu mediante la aplicación de fotocatalisis en aguas residuales sintéticas. Las condiciones óptimas fueron con un pH de 8, un tiempo de aplicación de 2 días, una dosis de catalizador (TiO₂) de 0.5 g/L y una eficiencia de remoción superior al 99.90%. Estos valores son similares a los informados por otros autores.

Palavras-chave: Proceso Fotocatalisis, *eficiência de remoción fotocatalítica de cobre y hierro.*

1. INTRODUCCIÓN:

El proceso de fotocatalisis fue estudiado mundialmente para remoción de metales pesados. Agustina y colaboradores, en 2022, estudiaron el efecto del pH, la dosis de catalizador y el tiempo de irradiación en la reducción de metales pesados de cobre (Cu), hierro (Fe) y plomo (Pb), en la metodología utilizaron ZnO como fotocatalizador y la luz solar como fuente de energía en muestras de agua

sintéticas. Los resultados demostraron un alto porcentaje de eliminación de más del 99% que ocurrieron en los primeros 15 minutos de irradiación solar, utilizaron 0,1 g/L de catalizador con un pH de 7-8 para Cu, 6 para Fe y 8 para Pb. Concluyeron que, en la fotocatalisis de aguas residuales sintéticas, lograron la remoción de metal hasta 99.46%, 99.91% y 99.70%, respectivamente.

Por otro lado, Alkaabi y colaboradores en 2022, diseñaron un reactor fotocatalítico

microfluídico para remoción de componentes orgánicos volátiles. Obtuvieron como resultado del análisis de sensibilidad para la economía del microrreactor fotocatalítico siendo que el volumen óptimo de producción de la planta fue 10.000 unidades por año. Con este volumen, el costo total de fabricación fue de 2,8 M\$/año con un costo de producción de \$127 por unidad. Asimismo, Kumar et al., (2021) aplicaron un sistema híbrido de reducción y cristalización fotocatalítica para la eliminación y recuperación de plomo. Los resultados demostraron que, usando fotocatalisis, la eliminación máxima de iones de plomo fue del 79.6% en condiciones optimizadas con dosis de 2 g/L TiO_2 , pH 5.3 y 35 W/cm² de intensidad de luz UV, mientras que la cristalización por reducción eliminó el 90% de los iones de plomo utilizando hidrato de hidracina como agente reductor con parámetros optimizados de pH 10 y temperatura a 80 °C. Por su parte, Betancourt et al. (2019) analizaron la selectividad en la degradación fotocatalítica de aguas residuales en minas de oro ($\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}$) usando TiO_2 suspendido con secuestrantes de ácidos orgánicos y alcohólicos en un foto-reactor mini-CPC con un LED UV-A de 30 W como fuente artificial de luz. Los resultados alcanzaron un 80% de degradación de $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}$, un 40% de eliminación de Fe y un 18 ppm de liberación de CN de cianuro libre a la fase líquida. Mientras que, Caicedo et al. (2019) evaluaron la oxidación de $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}$ en un sistema fotocatalítico típico con la adición de H_2O_2 , usando el catalizador TiO_2 con potencia de radiación UV (120 y 200W). Los resultados evidenciaron que el efecto de fotólisis en una solución de ferrocianuro a 100 mg/L a pH alcalino 13, asimismo la concentración estequiométrica fue 2,5 veces menor que el peróxido utilizado en la industria minera del oro, alcanzando un 83% de degradación.

Además, Bermúdez y Salazar (2019) analizaron las formas de electrocoagulación y fotocatalisis heterogénea para evacuar metales pesados en agua desperdiciada de una industria metalúrgica. Diseñaron dos prototipos de reactor tipo batch y de recirculación, mediante radiación UV artificial sostenida por una lámpara de cuarzo a temperatura ambiente, pH de 4.58, voltaje, (15, 18, 20), y duración del proceso (3,4 y 5 min), completando en fotocatalisis UV/ TiO_2 / H_2O_2 . Se obtuvo como resultados que la reducción de cromo hexavalente y cadmio sucedió en condiciones óptimas de 15 voltios y 4.5 amperios durante 5 min a temperatura ambiente. Los tratamientos presentaron una tasa de remoción de 99.7% y 99.5% de cromo y cadmio respectivamente.

Hernández en 2022, aplicó un método de fotocatalisis heterogénea con la finalidad de purificar los efluentes mineros de Michiquillay mediante un fotorreactor horizontal con TiO_2 en dosificación de 1,0 g/L, el tratamiento fotocatalítico tuvo una eficiencia de remoción de 86.12% de hierro, no cumpliendo con límites máximos permisibles.

No obstante, Trujillo en 2022, evaluó el método de oxidación solar en la evacuación de arsénico y bario de las cálidas aguas termales Tauripampa, en Huánuco utilizando alambres de hierro, jugo de limón y radiación solar. Las experimentaciones iniciales demostraron una cantidad de 0.17 mg/L y 1.1 mg/L de arsénico y bario respectivamente, mientras que luego del tratamiento se obtuvo una cantidad final de 0.116 mg/L de arsénico y 0.174 mg/L de bario, siendo que el tratamiento logró una remoción de 68.23% y 15.81% para arsénico y bario.

Por su parte, Travezaño y Valenzuela (2019) evaluaron la eliminación de derrames de petróleo por fotocatalisis heterogénea, incluyendo 2 g/L catalizador (TiO_2), 1 ml/L peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y corrosivo clorhídrico para estabilizar el pH a 4, asimismo se analizaron tiempos de 1 y 3 horas y concentraciones del contaminante a 3 y 5 mg/L. Los resultados revelaron una tasa de degradación de materia orgánica a 3 horas fue de 84,00 % y 73,18 % de 3 y 5 mg/L de contaminante respectivamente.

En cambio, Inquil (2019) estudió la adsorción de plomo y hierro a través la utilización de nanopartículas de dióxido de titanio (TiO_2) en aguas provenientes del Río Santa don la principal fuente de contaminación proviene de pasivos ambientales de minería en Ancash. Los resultados indicaron una cantidad inicial de plomo fue 2.361 mg/L y la cantidad inicial de hierro 31.86 mg/L, luego del tratamiento se obtuvo una concentración final de hierro de 2.33 mg/L y para plomo se logró una concentración final de 0.482 mg/L utilizando una dosis de 600 mg y un tiempo de tratamiento de 60 minutos. El tratamiento tuvo una eficiencia de 92.69%, y 79.58% en la remoción de hierro y plomo respectivamente.

Finalmente, Martínez (2019) estudió la eliminación del mercurio divalente en una solución acuosa por medio de la fotocatalisis en un reactor de placa de nivel inclinado a escala de laboratorio con tres dosificaciones de mercurio introducidas en niveles de 0.02 mg/L, 0.2 mg/L y 2 mg/L, con dos cantidades del fotocatalizador dióxido de titanio; obteniendo como resultados que la aplicación de la estrategia de fotocatalisis a las

aguas subterráneas logró una tasa de evacuación de mercurio divalente con 50 gramos de TiO_2 .

El presente artículo muestra el uso de la fotocatalisis para la remoción de hierro y cobre en aguas sintéticas de minas de oro, optimizándolo mediante el diseño factorial 3^3 .

2. PARTE EXPERIMENTAL:

2.1. Materiales

Se preparo una solución matriz conteniendo 300ppm de Fe y Cu. Así se utilizó sales de $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ y $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$.

También se usó: HNO_3 y H_2SO_4 conc., una solución de NaOH (50%), agua destilada y TiO_2 .

El aparato utilizado para el experimento consiste de un reactor fotocatalítico de tipo batch con ingreso de agua residual sintética los metales Cu y Fe, la carga hidráulica es de 100m³/h el tempo de duración del experimento es de 7 horas continuación durante 2 días. Después que los reactores son cargados se regula el pH alcalino y se adiciona TiO_2 como catalizador. Transcurrido el primer día de reacción se remueven los metales y luego se recupera el catalizador por recirculación. A continuación se presenta un diagrama esquemático del sistema fotovoltaico utilizado Figura 2.

2.2. Métodos

El abordaje experimental para construir el modelo empírico se siguió utilizando la metodología de diseño factorial 3^3 , que es una técnica de optimización, basada en el empleo de matrices de planificación factoriales completas. Así se investigó la aplicación de la fotocatalisis para la remoción de Fe y Cu experimentando tres factores con tres niveles y sin repeticiones. los cuales fueron ensayados en las siguientes condiciones: con catalizador de TiO_2 en dosis de 1, 2 y 3 g/L, pH en rangos de 2, 5 y 8, y un tiempo de retención en 1, 2 y 3 días. Por lo tanto, la combinación de los factores resultó en 27 condiciones experimentales, según se muestra en la Tabla 01.

Tabla 1: Primera matriz de diseño factorial 3^3 .

N°	Tratamiento	Factores			Combinación
		X	Y	Z	
		Dosis	pH	Días	
1	T1	1	2	1	X ₁ Y ₁ Z ₁
2	T2	2	2	1	X ₂ Y ₁ Z ₁
3	T3	3	2	1	X ₃ Y ₁ Z ₁
4	T4	1	5	1	X ₁ Y ₂ Z ₁
5	T5	2	5	1	X ₂ Y ₂ Z ₁
6	T6	3	5	1	X ₃ Y ₂ Z ₁
7	T7	1	8	1	X ₁ Y ₃ Z ₁
8	T8	2	8	1	X ₂ Y ₃ Z ₁
9	T9	3	8	1	X ₃ Y ₃ Z ₁
10	T10	1	2	2	X ₁ Y ₁ Z ₂
11	T11	2	2	2	X ₂ Y ₁ Z ₂
12	T12	3	2	2	X ₃ Y ₁ Z ₂
13	T13	1	5	2	X ₁ Y ₂ Z ₂
14	T14	2	5	2	X ₂ Y ₂ Z ₂
15	T15	3	5	2	X ₃ Y ₂ Z ₂
16	T16	1	8	2	X ₁ Y ₃ Z ₂
17	T17	2	8	2	X ₂ Y ₃ Z ₂
18	T18	3	8	2	X ₃ Y ₃ Z ₂
19	T19	1	2	3	X ₁ Y ₁ Z ₃
20	T20	2	2	3	X ₂ Y ₁ Z ₃
21	T21	3	2	3	X ₃ Y ₁ Z ₃
22	T22	1	5	3	X ₁ Y ₂ Z ₃
23	T23	2	5	3	X ₂ Y ₂ Z ₃
24	T24	3	5	3	X ₃ Y ₂ Z ₃
25	T25	1	8	3	X ₁ Y ₃ Z ₃
26	T26	2	8	3	X ₂ Y ₃ Z ₃
27	T27	3	8	3	X ₃ Y ₃ Z ₃

En el proceso fotocatalítico interviene la radiación solar como fuente de energía, el fotocatalizador y agua residual sintética. Se tuvo un sistema compuesto por un reactor sobre una superficie reflectante para mejorar la incidencia de rayos solares, el fotocatalizador al ser un semiconductor posee dos bandas, donde los rayos UV hacen que se produzcan transferencia de electrones desde la banda de valencia hacia la banda de conducción, por lo que se genera la zona de oxidación y reducción respectivamente. La generación de radicales hidroxilos y los electrones reductores fueron los encargados de remover contaminantes orgánicos y metales pesados. En la Figura 2 se muestra el diagrama del proceso de fotocatalisis.

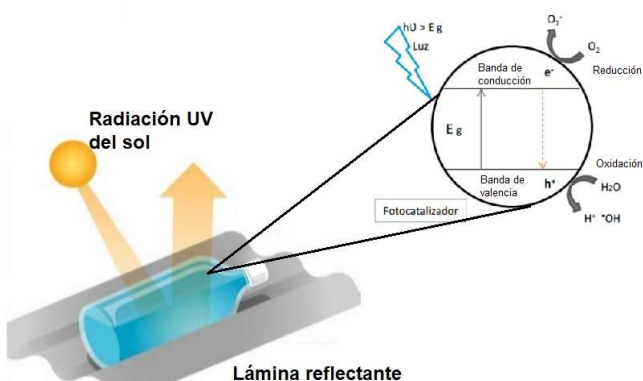


Figura 1. Diagrama del proceso de fotocatalisis.

La arreglo experimental consistió de 5 etapas, como son: la definición del sistema; el modelamiento del reactor; el escalonamiento del sistema; la validación experimental y la evaluación económica.

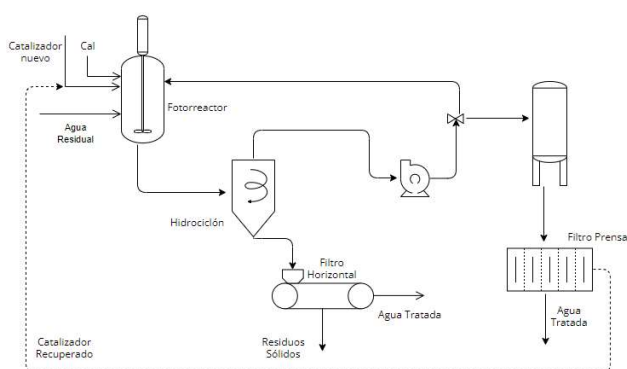


Figura 2. Arreglo experimental del proceso de fotocatalisis.

Para la validación experimental se realizaron los ensayos preparando una muestra de agua residual sintética conteniendo una concentración conocida de hierro y cobre de 300ppm. El catalizador TiO_2 fue evaluado para definir la dosis adecuada, por lo que se realizaron ensayos con concentraciones de 1, 2 y 3 g/l. Así mismo para cada tratamiento las condiciones del pH fueron de 2, 5 y 8 respectivamente.

El tiempo de retención se evaluó en el día 1, 2 y 3. Luego se realizaron extracciones diarias para calcular la eficiencia de remoción de los contaminantes para cada tratamiento según Ecuación 1,

$$\% \text{ Remoción} = \frac{VP_i - VP_f}{VP_i} \times 100 \quad (\text{Eq. 1})$$

Donde VP_i , valor del parámetro inicial
 VP_f , Valor del parámetro final

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN:

3.1. Resultados

Los resultados de las muestras de agua sintética luego de la aplicación de la fotocatalisis (Tabla 2). Además, en la Figura 2, se observa la disminución de las concentraciones de Fe llegando a una remoción de hasta 0.02ppm durante dos días de aplicación.

Tabla 2: Resultados de la 1° matriz, de remoción de Fe y Cu después de la aplicación fotocatalítica.

N° Corrida	Tratamiento	Fe (ppm)	Cu (ppm)
1	T1	151.5	160.5
2	T2	114.5	136
3	T3	122	131
4	T4	61.4	109.8
5	T5	58	95.4
6	T6	60.8	104.4
7	T7	1.05	1.22
8	T8	1.54	1.64
9	T9	2.3	2.02
10	T10	93	111.5
11	T11	81.5	97.5
12	T12	99.5	108
13	T13	54.4	79.6
14	T14	36.4	74.2
15	T15	51.7	86.6
16	T16	0.02	0.09
17	T17	0.05	0.36
18	T18	0.06	0.41
19	T19	109.5	116.5
20	T20	100	114
21	T21	107.5	115.5
22	T22	56.8	94.6
23	T23	48	83
24	T24	52.2	91.4
25	T25	0.4	0.67
26	T26	0.63	0.77
27	T27	0.92	1.04

La Figura 3 muestra el resultado de la remoción de Fe, llegando a un valor óptimo de 0.02ppm

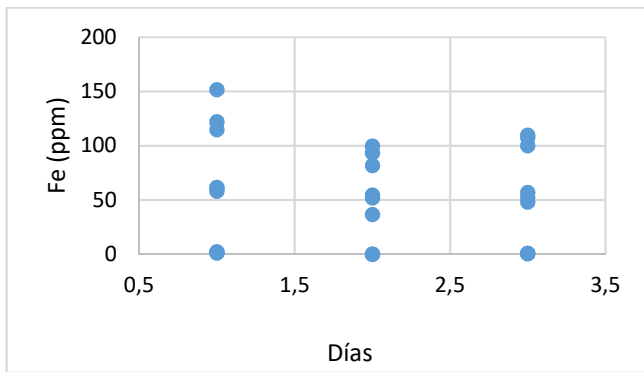


Figura 3: concentración de Fe según el tiempo

La Figura 4 muestra el resultado de la remoción de Cu, llegando a un valor óptimo de 0.09 ppm.

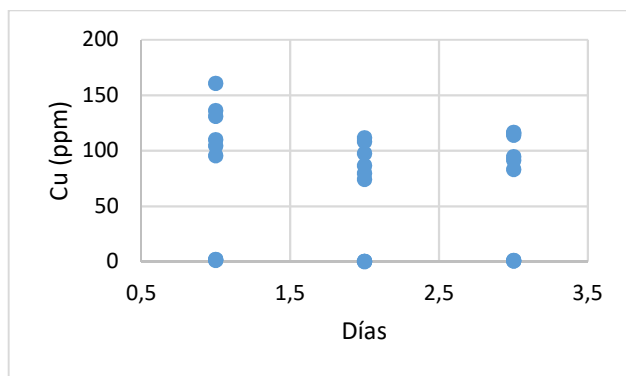


Figura 4: concentración de Cu según el tiempo

En la Figura 5, se evidencia que para un pH 8 resultaron menos concentraciones de Fe, por lo tanto, siendo esta la condición óptima de tratamiento, destacando una mayor remoción hasta 0.02 ppm.

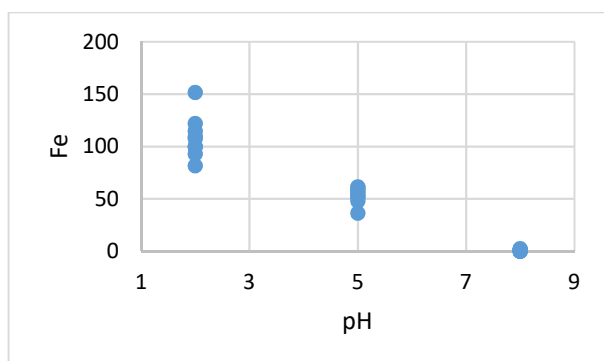


Figura 5: concentración de Fe según el pH

En la Figura 6, se observa que en el para un pH 8 disminuyó la concentración de Cu, por lo tanto, se asume como condición óptima de

tratamiento, destacando una mayor remoción hasta 0.09 ppm.

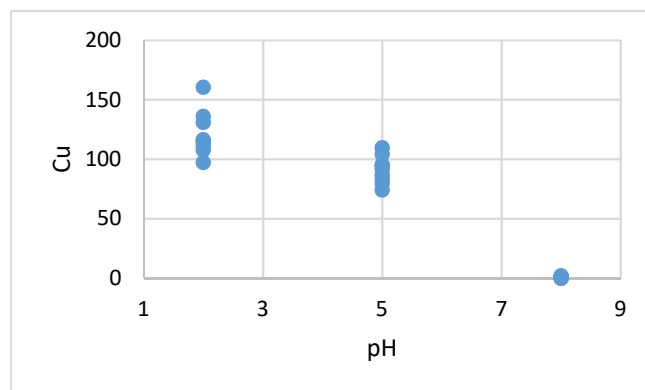


Figura 6: concentración de Cu según el pH

En la Figura 7, se observa que las concentraciones de Cu y Fe, con dosis de 0.5 de TiO₂ (g/L) disminuyeron desde 160.5 ppm hasta 0.009 ppm y de 151.5 ppm hasta 0.02 ppm, respectivamente. Esta situación puede deberse a la influencia de otros factores como pH y tiempo de aplicación.

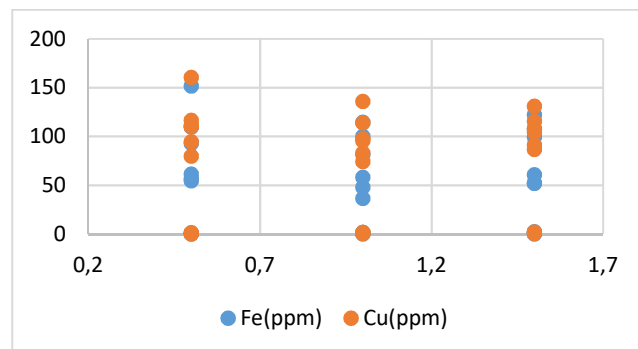


Figura 7: concentración de Fe y Cu según la Dosis

La Tabla 3 muestra las estimaciones de la eficiencia de remoción obtenidos luego de la aplicación de fotocatalisis en muestras de agua sintética.

Se observa que, para el caso del Fe, resultó una mayor remoción de 99.99% en el Tratamiento 16, a diferencia de la menor remoción de 48.78% con el Tratamiento 1. Para el caso del Cu, resultó una mayor remoción de 99.97% en el Tratamiento 16 a diferencia de la menor remoción de 44.88% con el Tratamiento 1.

Tabla 3: Resultados de la eficiencia de remoción de Fe y Cu después de la aplicación fotocatalítica.

Tratamiento	%R Fe	%R Cu
T1	48.78	44.88
T2	61.29	53.30
T3	58.76	55.01
T4	79.24	62.29
T5	80.39	67.24
T6	79.45	64.15
T7	99.65	99.58
T8	99.48	99.44
T9	99.22	99.31
T10	68.56	61.71
T11	72.45	66.52
T12	66.36	62.91
T13	81.61	72.66
T14	87.69	74.52
T15	82.52	70.26
T16	99.99	99.97
T17	99.98	99.88
T18	99.98	99.86
T19	62.98	59.99
T20	66.19	60.85
T21	63.66	60.34
T22	80.80	67.51
T23	83.77	71.50
T24	82.35	68.61
T25	99.86	99.77
T26	99.79	99.74
T27	99.69	99.64

3.2. Discusión

Prueba Estadística de la validez de los datos obtenidos:

Se aplicó un estudio factorial de dos factores de dosis del catalizador de TiO_2 y pH establecidos como factor A y factor B respectivamente, los cuales abarcaron tres niveles relacionados con dosis de 1, 2 y 3 g/L y pH en rangos de 2, 5 y 8, asimismo el tiempo de retención en 1, 2 y 3 días para la corrida de datos. De esta manera, se determinó los efectos de los factores A, B y C, así como la interacción de ambos factores definido como AB, AC, BC y ABC.

La Tabla 4 y 5 muestran el análisis de varianza para los tres factores durante la remoción del Fe y el Cu respectivamente, durante la aplicación fotocatalítica.

De acuerdo a la Tabla 4, se observa que el factor de pH tiene mayor influencia sobre la remoción de Fe en aguas sintéticas con concentraciones de agua de mina, seguido del factor tiempo, mientras que el factor de dosis tiene la menor influencia en el proceso de remoción. Además, la combinación de los dos factores de pH y tiempo presentan mayor efecto, en comparación con los dos factores de pH y dosis que tienen menor efecto en el proceso de fotocatalisis. Por el contrario, tanto la combinación de tiempo y dosis, como la combinación de los tres factores de pH, tiempo y dosis no resultan con efectos significativos en el tratamiento de remoción.

De acuerdo a la Tabla 5 se observa que el factor de pH tiene mayor influencia sobre la remoción de Cu en aguas sintéticas con concentraciones de agua de mina, seguido del factor tiempo, mientras que el factor de dosis tiene la menor influencia en el proceso de remoción. Además, la combinación de los dos factores de pH y tiempo presentan mayor efecto, en comparación con los dos factores de pH y dosis que tienen menor efecto en el proceso de fotocatalisis. Por el contrario, tanto la combinación de tiempo y dosis, como la combinación de los tres factores de pH, días y dosis no resultan con efectos significativos en el tratamiento de remoción.

4. CONCLUSIONES:

Se llegaron a las condiciones óptimas para la remoción de Fe y Cu con pH de 8 y dos días de tratamiento en el sistema fotocatalítico constituido por botellas plásticas y laminas reflectantes. Estos resultados fueron próximos a los encontrados por Agustina et al. (2022), donde se logró una reducción de metales pesados a un pH de 7-8 en el caso de Cu, mientras que, para Fe el pH fue de 6. En cambio, el tiempo de remoción en ambos parámetros ocurrió en 15 minutos, lo cual puede explicarse por el contacto directo con la luz solar, pues se utilizó un vaso de precipitado para contener la solución de agua residual sintética de metales pesados y el catalizador.

Por otra parte, en la investigación de Inquil (2019) se logró la adsorción de Pb y Fe en aguas provenientes del Río Santa afectadas por contaminación de pasivos ambientales mineros en condiciones de laboratorio, en este sentido, el tiempo de tratamiento fotocatalítico se desarrolló en 20, 40 y 60 minutos, siendo este último el que obtuvo los mejores resultados de adsorción. No

obstante, este autor no estudió la influencia del pH sobre el proceso fotocatalítico, y tampoco describió el sistema de tratamiento que llevó a cabo en la experimentación.

Se alcanzó una dosis de catalizador para obtener la máxima remoción de Cu y Fe en 0.5 g/L de TiO₂, logrando disminuir de 160.5 ppm hasta 0.009 ppm, y de 151.5 ppm hasta 0.02 ppm, respectivamente. En comparación con la investigación de Hernández (2022), donde se aplicó un método de fotocatalisis para la purificación de aguas residuales de mina mediante un foto-reactor horizontal con TiO₂ en dosificación de 1,0 g/L, obteniendo como resultados iniciales de concentración de Fe en 19.7 mg/L. Mientras que la aplicación del tratamiento logró disminuir la carga contaminante hasta una concentración final de 2.73 mg/L.

Se consiguió una eficiencia de remoción del proceso fotocatalítico, para Fe de hasta 99.99%, mientras que para Cu, resultó de 99.97%. Estos resultados son similares a Agustina et al. (2022), donde la fotocatalisis de aguas residuales sintéticas logró la remoción de metales pesados hasta 99.46% y 99.91% para Cu y Fe respectivamente. Por el contrario, los resultados fueron superiores a los obtenidos por la investigación de Inquil (2019), donde el tratamiento tuvo una eficiencia de 92.69% en la remoción de Fe. Mientras que, Hernández (2022) aplicando también el tratamiento foto-catalítico obtuvo una eficiencia de remoción de solamente 86.12% de Fe.

5. DECLARACIONES

5.1. Agradecimientos

A la Facultad de Ingeniería Química y textil de la Universidad Nacional de Ingeniería por el uso de sus instalaciones para el desarrollo de la investigación.

5.2. Fuente de financiamiento

Los autores financiaron esta investigación

5.3. Interes

No hay conflicto de interes.

5.4. Acceso abierto

Esta investigación es de acceso abierto

por lo que los resultados producto de esta investigación es abierto al publico.

7. REFERENCIAS:

1. Agustina, T. E., Habiburrahman, M., Amalia, F., Arita, S., Faizal, M., Novia, N. (2022). Reduction of Copper, Iron, and Lead Content in Laboratory Wastewater Using Zinc Oxide Photocatalyst under Solar Irradiation. *Journal of Ecological Engineering*, 23 (10), 107-115.
2. Alkaabi, M., Mohamed, M., Almanea, A., AlShehhi, M., Farousha, K., Yusuf, A., & Palmisano, G. (2023). Design of a Microfluidic Photocatalytic Reactor for Removal of Volatile Organic Components: Process Simulation and Techno-Economic Assessment. *ACS Omega*, 7(10), 8306-8313.
3. Betancourt, L. A., Ossa, O. E., Rodriguez, J. C., Barraza, J. M., Marriaga, N., & Machuca-Martínez, F. (2016). Anoxic photocatalytic treatment of synthetic mining wastewater using TiO₂ and scavengers for complexed cyanide recovery. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 18(4), 853-862.
4. Caicedo, D. F., Brum, I. A. S., & Buitrago, L. A. B. (2019). Photocatalytic degradation of ferricyanide as synthetic gold mining wastewater using TiO₂ assisted by H₂O₂. *REM - International Engineering Journal*, 73, 99-107.
5. Bermúdez, M. D., & Salazar, S. A. (2019). Aplicación de fotocatalisis heterogénea y electrocoagulación en depuración de Cr y Cd en agua residual proveniente de una industria metalmeccánica. *Tesis de grado, Universidad de Guayaquil. Facultad de Ingeniería Química*.
6. Hernández, J. L. (2022). Aplicación de la fotocatalisis heterogénea para la remoción de cobre y hierro en los drenajes ácidos de mina en la zona minera Michiquillay 2021, *Tesis de grado, Universidad Privada del Norte*.
7. Kumar, V., Wanchoo, R. K., & Toor, A. P. (2021). Photocatalytic Reduction and Crystallization Hybrid System for Removal and Recovery of Lead (Pb). *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 60(24), 8901-8910.
8. Trujillo, L. D. (2022). Efecto del proceso de oxidación solar en la remoción de arsénico y

bario en aguas del balneario termal tauripampa, distrito de la unión, provincia de dos de mayo, departamento de Huánuco. *Universidad de Huánuco.*

9. Travezaño, A. W., & Valenzuela, E. M. (2019). Influencia del tiempo y la concentración del contaminante en la degradación de aguas con derrames de aceite por fotocatalisis heterogénea a las condiciones del Valle del Mantaro. *Universidad Nacional del Centro del Perú.*

10. Inquil, L. (2019). Aplicación de

nanopartículas de dióxido de titanio (TiO₂) para la adsorción de plomo y hierro en aguas provenientes del río Santa en la zona de Recuay, Ancash. *Tesis de grado, Universidad César Vallejo.*

11. Martínez, M. A. (2019). Influencia del peso de TiO₂ en la remoción de mercurio divalente en un fotocatalizador de placas planas inclinadas. *Universidad Nacional Agraria de la Selva.*

Tabla 4: Análisis de varianza para el Fe.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	14	55687.1	3977.7	97.83	0.000
Lineal	6	54327.5	9054.6	222.69	0.000
A=pH	2	52504.3	26252.2	645.65	0.000
B=Días	2	1386.5	693.2	17.05	0.000
C=TiO ₂ (g/L)	2	436.7	218.3	5.37	0.022
Interacción doble	8	1359.6	170.0	4.18	0.013
A*B	4	1068.0	267.0	6.57	0.005
A*C	4	291.6	72.9	1.79	0.195
Error	12	487.9	40.7		
Total	26	56175.0			

Tabla 5: Análisis de varianza para el Cu.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	14	73986.0	5284.7	190.05	0.000
Lineal	6	72698.7	12116.4	435.74	0.000
A=pH	2	70459.5	35229.7	1266.9	0.000
B=Días	2	1954.1	977.0	35.14	0.000
C=TiO ₂ (g/L)	2	285.1	142.6	5.13	0.025
Interacción doble	8	1287.4	160.9	5.79	0.004
A*B	4	1042.9	260.7	9.38	0.001
A*C	4	244.4	61.1	2.20	0.131
Error	12	333.7	27.8		
Total	26	74319.7			