

# REVISTA DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA



ISSN: 2709-4502

Alpha Centauri

Vol. 02 Nro. 03 | 2021



Peso de  $TiO_2$  en la remoción de mercurio divalente en un fotocatalizador de placas planas inclinadas



Weight of  $TiO_2$  in the removal of divalent mercury on a tilted flat plate photocatalyst



Peso de  $TiO_2$  na remoção de mercúrio divalente sobre um fotocatalisador de placa plana inclinado


<https://doi.org/10.47422/ac.v2i3.39>

## Peso de $\text{TiO}_2$ en la remoción de mercurio divalente en un fotocatalizador de placas planas inclinadas

## Weight of $\text{TiO}_2$ in the removal of divalent mercury on a tilted flat plate photocatalyst


## Peso de $\text{TiO}_2$ na remoção de mercúrio divalente sobre um fotocatalisador de placa plana inclinado

 MARTÍNEZ TRUJILLO, Mario André  
Universidad Nacional Agraria de la Selva

 ORÉ CIERTO, Luis Eduardo  
Universidad Nacional Agraria de la Selva

 LOARTE ALIAGA, Wendy Caroline  
Universidad de Huánuco

 ORÉ CIERTO, Juan Daniel  
Universidad de Huánuco

 SEMPETEGUI RAFAEL, Roxana Mabel  
Universidad Nacional Autónoma de Chota

### RESUMEN

El objetivo de la presente investigación fue la remoción de mercurio divalente en medio acuoso mediante la fotocatálisis en un reactor de placas planas inclinadas a escala de laboratorio con tres diferentes concentraciones de mercurio inicial 0.02 mg/l, 0.2 mg/l y 2 mg/l, con dos diferentes pesos del fotocatalizador dióxido de titanio; estas variables se arreglaron factorialmente, generando 9 tratamientos, para cada tratamiento se contó con 3 repeticiones. Dichos tratamientos se implementaron un reactor de placas planas inclinadas a escala de laboratorio. La aplicación del método de fotocatálisis a las aguas en estudio permitió determinar que la tasa de remoción de mercurio divalente fue la de 50 gramos de dióxido de titanio, seguido el de 25 gramos de dióxido de titanio y por último el de 100 gramos de dióxido de titanio.

**Palabras clave:** fotocatálisis heterogénea, remoción, dióxido de titanio, mercurio divalente.

## ABSTRACT

The objective of the present investigation was the removal of divalent mercury in aqueous media by means of photocatalysis in a laboratory scale inclined flat plate reactor with three different initial mercury concentrations 0.02 mg/l, 0.2 mg/l and 2 mg/l, with two different weights of the photocatalyst titanium dioxide; these variables were arranged factorially, generating 9 treatments, for each treatment there were 3 replicates. These treatments were implemented in a laboratory scale inclined flat plate reactor. The application of the photocatalysis method to the water under study determined that the removal rate of divalent mercury was 50 grams of titanium dioxide, followed by 25 grams of titanium dioxide and finally 100 grams of titanium dioxide.

**Keywords:** heterogeneous photocatalysis, removal, titanium dioxide, divalent mercury.

## RESUMO

O objectivo da presente investigação foi a remoção de mercúrio divalente em meio aquoso por meio de fotocatalise num reactor de placa plana inclinada à escala laboratorial com três concentrações diferentes de mercúrio inicial 0,02 mg/l, 0,2 mg/l e 2 mg/l, com dois pesos diferentes do dióxido de titânio fotocatalítico; estas variáveis foram organizadas factorialmente, gerando 9 tratamentos, para cada tratamento houve 3 repetições. Estes tratamentos foram implementados num reactor de placa plana inclinado à escala laboratorial. A aplicação do método de fotocatalise à água em estudo determinou que a taxa de remoção de mercúrio divalente era de 50 gramas de dióxido de titânio, seguida de 25 gramas de dióxido de titânio e finalmente 100 gramas de dióxido de titânio.

**Palavras-chave:** fotocatalise heterogénea, remoção, dióxido de titânio, mercúrio divalente.

## INTRODUCCIÓN

La demanda de la sociedad para la descontaminación de sus fuentes hídricas y la conservación general del medio ambiente ha tomado gran fuerza en los últimos años. Las regulaciones ambientales son cada vez más estrictas, y los procesos de depuración de aguas contaminadas se mantienen bajo constante vigilancia. Uno de los tantos contaminantes son los metales pesados, tomando como punto de investigación al mercurio, el cual es muy utilizado en la extracción del oro o la plata, para separar el metal precioso se forma una amalgama del mineral con el Hg, la cual posteriormente se quema, lo que causa la liberación ambiental del Hg en forma de vapor. La necesidad de preservar el medio ambiente ha llevado a la búsqueda de nuevos métodos para la eliminación eficiente de los compuestos químicos que alteran la estabilidad de nuestros recursos. La contaminación con mercurio proveniente de la minería es importante debido a que existe gran cantidad de gente que trabaja directamente con el mercurio y que puede llegar a intoxicarse seriamente con el mismo, pero, además, la quema de este metal al aire libre, sin las precauciones necesarias, puede llevar a la transformación del mismo y a la afectación no solo de aquellos cercanos al proceso de obtención del oro sino una buena parte del área circundante. La minería es un sector productivo importante en la generación de empleo y de ingresos económicos en las zonas mineras, es necesario tener en cuenta detalles como la salud de los involucrados en la obtención del oro (López, 2012).

Con la problemática antes expuesta se reconoce la necesidad de adoptar una tecnología de tratamiento más acorde con el tipo de contaminante a tratar y es en este punto que surge la fotocatalisis heterogénea como una opción viable y efectiva. Para la minimización de los impactos causados en los recursos hídricos por las industrias, en los últimos años se han implementado los procesos de oxidación avanzada (POA) como una alternativa tecnológicamente viable y novedosa para el tratamiento de los efluentes líquidos de dichas empresas. Colina (2012) manifiesta que entre los procesos más utilizados se encuentra la fotocatalisis que consiste en la aceleración de una fotorreacción mediante un catalizador, en este proceso la oxidación tiene lugar directamente en la superficie de la partícula que se utiliza como catalizador o semiconductor ( $\text{TiO}_2$ , entre otros), siendo la radiación solar la única fuente de energía. La fotocatalisis heterogénea mediada por  $\text{TiO}_2$  y la fotooxidación mediada por compuestos férricos son dos alternativas atractivas para el tratamiento de aguas; por lo que el objetivo del trabajo de investigación fue determinar el nivel de influencia del peso del  $\text{TiO}_2$  en la remoción de mercurio divalente en un fotocatalizador de placas planas inclinadas.

## MATERIAL Y MÉTODOS

### Ubicación y descripción del área de estudio

La investigación se realizó en las instalaciones de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (Laboratorio de Calidad del Agua), ubicada en la



ciudad de Tingo María, distrito de Rupa Rupa, Provincia de Leoncio Prado, Región Huánuco.

### Materiales y equipos

Los materiales empleados fueron: agua destilada, matraz, probetas, pipetas, frascos de muestras, tubo de ensayo, varilla, vaso precipitado de 50 ml.; los materiales del fotocatalizador fueron: láminas de vidrio, manguerillas, motor de 12 V, regulador de paso de agua, baldes de 4 litros, latillas de metal, pegamento industrial; los reactivos fueron: cloruro de mercurio ( $\text{HgCl}_2$ ), dióxido de titanio, ditizona y dodecil Sulfato de Sodio (SDS).

Y los equipos utilizados fueron: balanza analítica marca Hanna, espectrofotómetro UV-VIS marca Thermo Scientific, luxómetro marca Hanna, peachimetro – HANNA Termómetro y conductímetro marca Hanna.

### Metodología

El equipo fotocatalizador consto de lo siguiente:

- Cada tratamiento tiene un recipiente de 4 litros c/u conteniendo el agua con cloruro de mercurio.
- Tres (3) placas planas inclinadas  $10^\circ$  de 15cm X 60cm, para cada concentración de cloruro de mercurio a trabajar haciéndose un total de 9 placas cada una con 3 celdas por placa para sus repeticiones donde se encontrará el fotocatalizador,  $\text{TiO}_2$  el cual fue adherido con el uso de silicona y secado previamente.

- Finalmente, se instaló un sistema de recirculación mediante una unos motores de 12 V.
- El funcionamiento y operación del equipo fue de la siguiente manera:
- Cada tanque de alimentación contuvo 4 litros de agua contaminada (simulada) con cloruro mercúrico  $\text{HgCl}_2$ , trabajándose con tres concentraciones diferentes con 0.02 mg/L, 0.2 mg/L y 2 mg/L. La función de este es alimentar de agua contaminada al sistema para su tratamiento.
- Mediante una llave de paso se graduará la salida de agua contaminada desde el recipiente.
- La posición de las placas estuvo orientada a la dirección de salida del sol para que pueda darse la reacción de fotocátalisis. Se dispuso de una malla a la hora del ingreso del agua, con la finalidad de homogenizar el curso del agua por toda la placa impregnada con el fotocatalizador.
- El agua contaminada después de pasar por el tratamiento llego a un colector, el mismo que fue recirculado al recipiente mediante un motor adaptado.
- A su vez se fueron registrando la temperatura ambiental, el grado de luxes, cada 30 minutos durante el tratamiento.

### Frecuencia del monitoreo

De acuerdo a la información proporcionada por SENAMHI (2019), se definieron los días para el





funcionamiento del equipo, esto es porque se buscó días de la semana con elevado nivel de radiación.

El equipo entro en funcionamiento un día por semana, entre las 11 am a 2 pm. Cada treinta (30) minutos se tomaron muestras de 100 ml (respectivamente rotulado) para su posterior análisis y evaluación.

### Preparación de materiales y equipos

Se preparó los frascos de muestreo, esterilizados y rotulados con el nombre de cada uno respectivamente. Para el análisis de pH, temperatura, conductividad eléctrica, y concentración de mercurio mediante espectrofotómetro UV.

### Determinación de Parámetros Físico – Químicos

- Determinación de Temperatura (°C), la temperatura se determinó mediante termometría realizada “in situ” con un termómetro de mercurio.
- Determinación del pH, se determinó mediante electrometría de electrodo selectivo (peachimetro HANNA). Se Mide el pH de la muestra colectada en un frasco o botella de vidrio.
- Determinación de Conductividad, se determinó mediante electrometría con un electrodo conductimétrico, expresando el resultado en micro siemens cm ( $\mu S\ cm^{-1}$ ). La medición ex situ.

- Intensidad luminosa, se determinó haciendo uso del luxómetro. Se midió la intensidad luminosa poniendo el luxómetro en una parte despejada, la unidad de medida es el lux.
- Determinación de la concentración del mercurio, se determinó mediante la espectrofotometría. Se introdujo la muestra de agua contaminada al espectrofotómetro, lo cual nos indicará la concentración del mercurio en la unidad de ppm.
- Determinación de la eficiencia del fotocatalizador con dióxido de titanio ( $TiO_2$ ), para la determinación de la eficiencia del fotocatalizador, se tuvo en cuenta la concentración del cloruro mercúrico del agua antes y después de hacerlo pasar por el fotoreactor, lo cual brindara la información de la concentración de remoción del contaminante y la eficiencia del fotocatalizador.

$$E = \left( \frac{X_E - X_S}{X_E} \right) * 100$$

## RESULTADOS

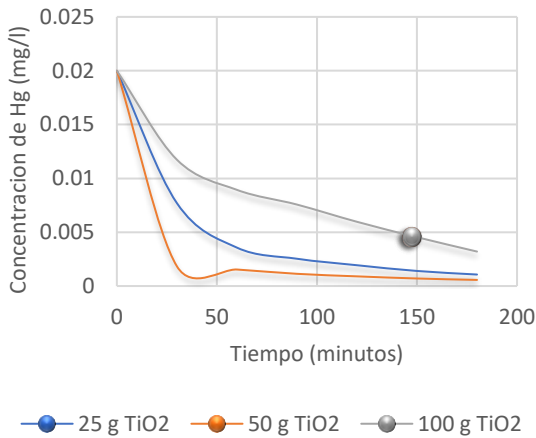
Evaluación del comportamiento de remoción de mercurio divalente en los diferentes tratamientos en función al tiempo de operación

Se realizaron 9 diferentes tratamientos variando la concentración del mercurio inicial (0.02 mg/l, 0.2 mg/l y 2 mg/l) y el peso del fotocatalizador en caso de la presente investigación se trabajó con dióxido de titanio (25 g, 50 g y 100g) con tres diferentes repeticiones para evaluar el

comportamiento de remoción del mercurio divalente durante en diferentes tiempos de operación.

**Figura 1**

*Comportamiento en la remoción a una concentración inicial de 0.02 mg/l en los diferentes pesos de dióxido de titanio.*

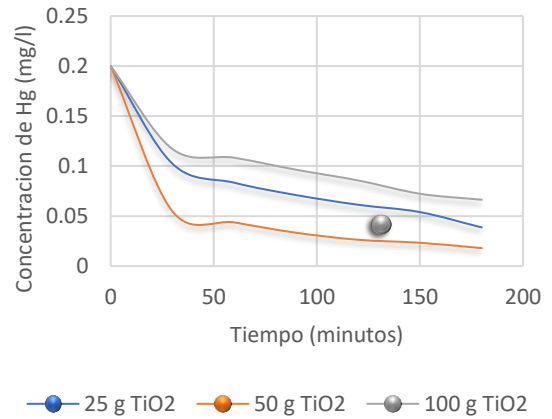


En la figura 1 se observar el comportamiento en la remoción de mercurio divalente a una concentración inicial de 0.02 mg/l, en la cual notamos una mayor eficiencia y rapidez en niveles de remoción de mercurio en el tratamiento en la cual se usó 50 gramos de TiO<sub>2</sub>, mientras que por otro lado se visualiza una remoción más lenta en el tratamiento que se utilizó 100 gramos de TiO<sub>2</sub>.

En la figura 2 se observar el comportamiento en la remoción de mercurio divalente a una concentración inicial de 0.2 mg/l, en la cual notamos una mayor eficiencia y rapidez en niveles de remoción de mercurio en el tratamiento en la cual se usó 50 gramos de TiO<sub>2</sub>, mientras que por otro lado se visualiza una remoción más lenta en el tratamiento que se utilizó 100 gramos de TiO<sub>2</sub>.

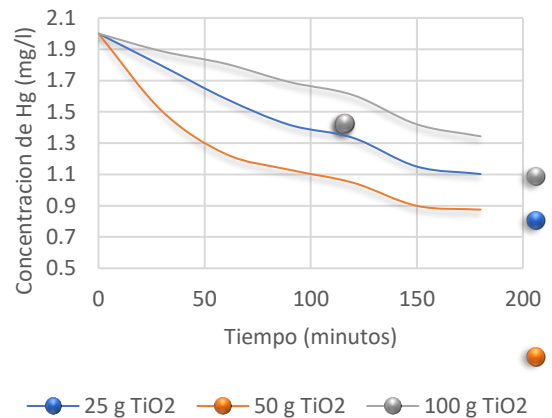
**Figura 2**

*Comportamiento en la remoción a una concentración inicial de 0.2 mg/l en los diferentes pesos de dióxido de titanio.*



**Figura 3**

*Comportamiento en la remoción a una concentración inicial de 2 mg/l en los diferentes pesos de dióxido de titanio.*



En la figura 3 se observar el comportamiento en la remoción de mercurio divalente a una concentración inicial de 2 mg/l, en la cual notamos una mayor eficiencia y rapidez en niveles de remoción de mercurio en el tratamiento en la cual se usó 50 gramos de TiO<sub>2</sub>, mientras que por otro lado se visualiza una remoción más lenta en el tratamiento que se utilizó 100 gramos de TiO<sub>2</sub>.

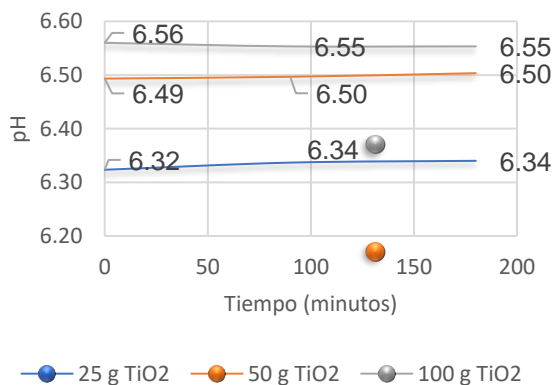
Evaluación del comportamiento de parámetros fisicoquímicos (pH, temperatura y conductividad eléctrica).

Se realizaron las medidas de pH, temperatura del agua y conductividad eléctrica en tres intervalos de tiempo diferentes (0, 90 y 180 minutos) con la finalidad de ver el comportamiento de los mismo ante el proceso de fotocatalisis y si se ven influenciados por las variables.

**Evaluación del comportamiento del pH**

**Figura 4**

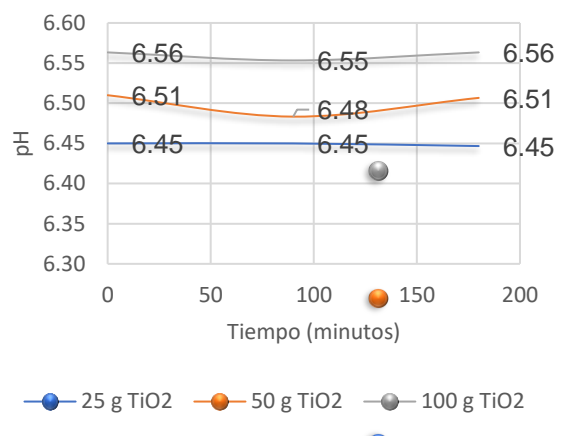
*Niveles de pH en el tiempo a una concentración inicial de 0.02 mg/l en los diferentes pesos de dióxido de titanio.*



En la figura 4 se observa los niveles de pH con una concentración inicial de 0.02 mg/l y sus comportamientos en con los diferentes pesos de dióxido de titanio; en todos los tratamientos se observa que hay una ligera variación en los valores de pH el tratamiento que se trabaja con 100 gramos de TiO<sub>2</sub> el pH termina con 6.55 el tratamiento de 50 gramos con 6.5 y el de 25 gramos 6.34.

**Figura 5**

*Niveles de pH en el tiempo a una concentración inicial de 0.2 mg/l en los diferentes pesos de dióxido de titanio.*

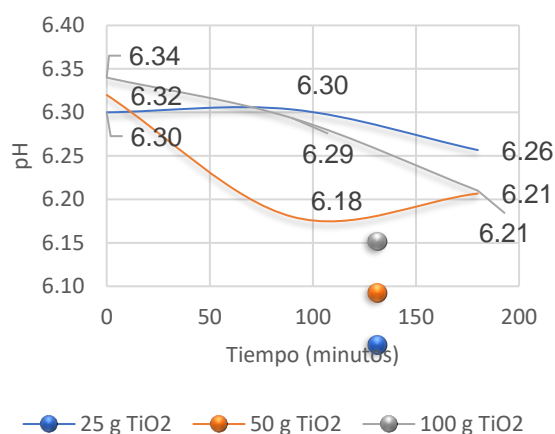


En la figura 5 se observa los niveles de pH con una concentración inicial de 0.2 mg/l y sus comportamientos en con los diferentes pesos de dióxido de titanio.



**Figura 6**

Niveles de pH en el tiempo a una concentración inicial de 2 mg/l en los diferentes pesos de dióxido de titanio.



En la figura 6 se observa los niveles de pH de los tratamientos en los cuales se utilizó una concentración inicial de 2 mg/l de mercurio y sus

comportamientos en con los diferentes pesos de dióxido de titanio; en todos los tratamientos se observa una disminución de pH a diferencia de los otros tratamientos en los cuales se trabajó con otras concentraciones iniciales de mercurio en los valores de pH el tratamiento que se trabaja con 100 gramos de TiO<sub>2</sub> el pH disminuye a 6.21 el tratamiento de 50 gramos con 6.21 y el de 25 gramos 6.26.

**Análisis de varianza para pH**

Se realizó el análisis de los datos (Tabla 1), se encontró la significancia de los factores; se obtuvieron valores para  $p < 0.05$  en todos los factores, lo cual indica que estos son estadísticamente significativos sobre la variación de pH en la remoción de mercurio divalente, con un 95% de confianza.

**Tabla 1**

ANVA para el pH

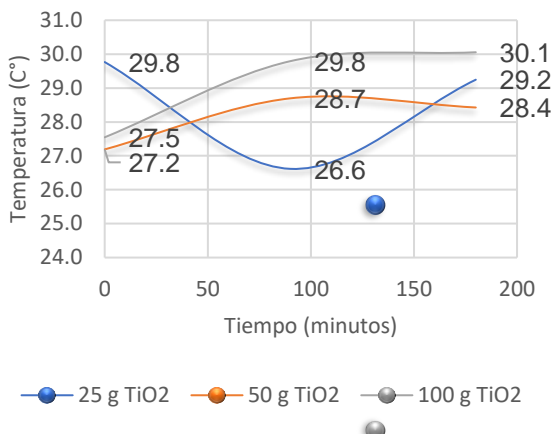
Fuente de variación	SC	GL	CM	Fc	Sig.
A: Concentración de Hg	0.853	2	0.427	254.400	0.001**
B: Peso TiO <sub>2</sub>	0.161	2	0.081	48.063	0.001**
C: Tiempo	0.014	2	0.007	4.070	0.023
Error experimental	0.091	54	0.002		
Total	1.318	80			



**Evaluación del comportamiento de la temperatura del agua.**

**Figura 7**

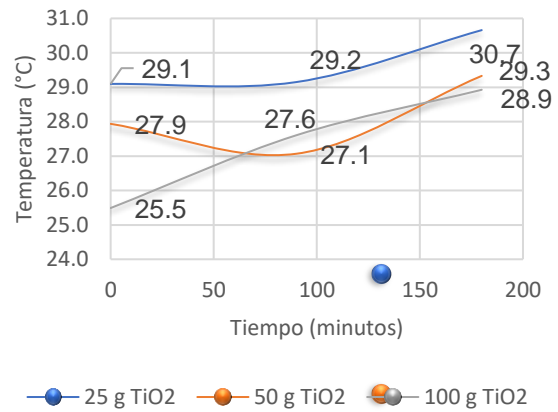
*Niveles de temperatura del agua en el tiempo a una concentración inicial de 0.02 mg/l en los diferentes pesos de dióxido de titanio.*



En la figura 07 se observa los valores de temperatura del agua de los tratamientos en los cuales se utilizó una concentración inicial de 0.02 mg/l de mercurio y sus comportamientos en con los diferentes pesos de dióxido de titanio; en todas las combinaciones podemos observar la fluctuación entre los 26.6 y 30.1; debiéndose esto que los valores de este parámetro no se ve influenciado por los pesos de dióxido de titanio sino por la temperatura del ambiente e incidencia solar durante la ejecución del tratamiento.

**Figura 8**

*Niveles de temperatura del agua en el tiempo a una concentración inicial de 0.2 mg/l en los diferentes pesos de dióxido de titanio.*



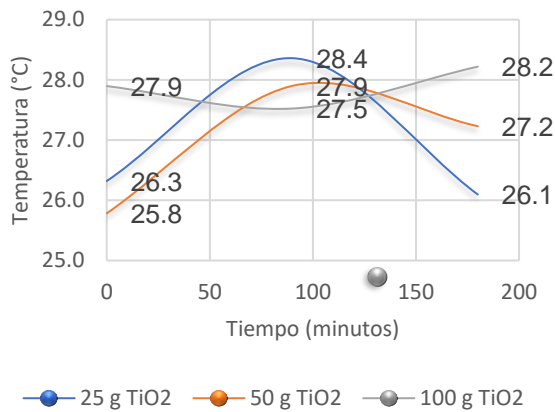
En la figura 08 se observa los valores de temperatura del agua de los tratamientos en los cuales se utilizó una concentración inicial de 0.2 mg/l de mercurio y sus comportamientos en con los diferentes pesos de dióxido de titanio; en todas las combinaciones podemos observar la fluctuación entre los 25.5 y 30.7; debiéndose esto que los valores de este parámetro no se ve influenciado por los pesos de dióxido de titanio sino por la temperatura del ambiente e incidencia solar durante la ejecución del tratamiento.

En la figura 9 se observa los valores de temperatura del agua de los tratamientos en los cuales se utilizó una concentración inicial de 2 mg/l de mercurio y sus comportamientos en con los diferentes pesos de dióxido de titanio; en todas las combinaciones podemos observar la fluctuación entre los 25.8 y 28.4; debiéndose esto que los valores de este parámetro no se ve influenciado por los pesos de dióxido de titanio sino por la

temperatura del ambiente e incidencia solar durante la ejecución del tratamiento.

**Figura 9**

*Niveles de temperatura del agua en el tiempo a una concentración inicial de 2 mg/l en los diferentes pesos de dióxido de titanio.*



**Análisis de varianza para la temperatura del agua**

Se realizó el análisis de los datos (Tabla 2), se encontró la significancia de los factores; se obtuvieron valores para p mayores a 0.05 en todos los factores, lo cual indica que estos no son estadísticamente significativos sobre la fluctuación en los niveles de temperatura del agua, con un 95% de nivel de confianza.

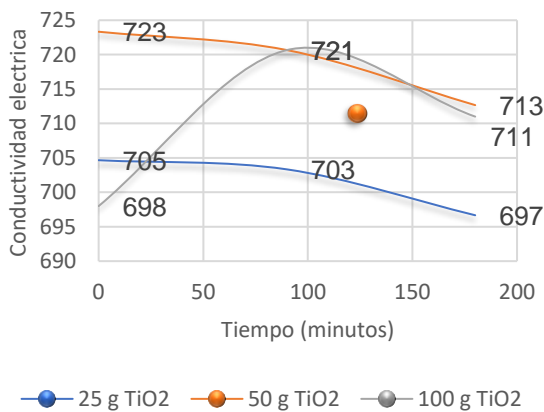
**Tabla 2.** ANVA para temperatura del agua

Fuente de variación	SC	GL	CM	Fc	Sig.
A: Concentración Hg	27.463	2	13.732	2.080	0.135
B: Peso TiO <sub>2</sub>	5.602	2	2.801	0.424	0.656
C: Tiempo	20.785	2	10.392	1.574	0.217
Error experimental	356.583	54	6.603		
Total	498.676	80			

**Evaluación del comportamiento de la conductividad eléctrica.**

**Figura 10**

*Niveles de conductividad eléctrica en el tiempo a una concentración inicial de 0.02 mg/l en los diferentes pesos de dióxido de titanio.*



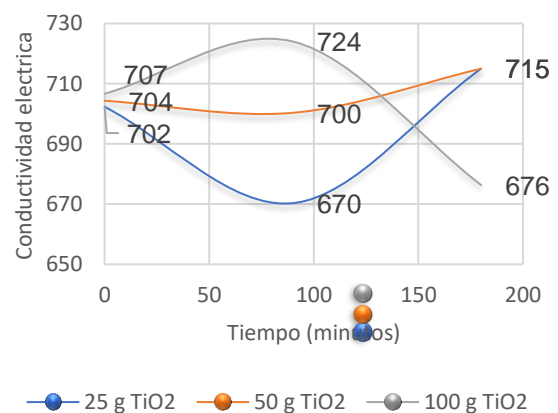
En la figura 10 se observa los valores de conductividad eléctrica del agua de los tratamientos en los cuales se utilizó una concentración inicial de 0.02 mg/l de mercurio y sus comportamientos en con los diferentes pesos de dióxido de titanio; observándose que en los pesos de 50 y 25 gramos de TiO<sub>2</sub> los niveles se reducen a 713 μSm y 697 μSm respectivamente, por otro lado en el tratamiento en el cual se trabajó con 100 gramos de TiO<sub>2</sub> se observa en primera instancia un aumento a 721 μSm y finalmente se reduce a 711 μSm.

En la figura 11 se observa los valores de conductividad eléctrica del agua de los tratamientos en los cuales se utilizó una concentración inicial de 0.2 mg/l de mercurio y sus comportamientos en con los diferentes pesos de

dióxido de titanio; observándose que en los pesos de 50 y 25 gramos de TiO<sub>2</sub> los niveles se reducen un poco para finalmente aumentar a 715 μSm en ambos tratamientos.

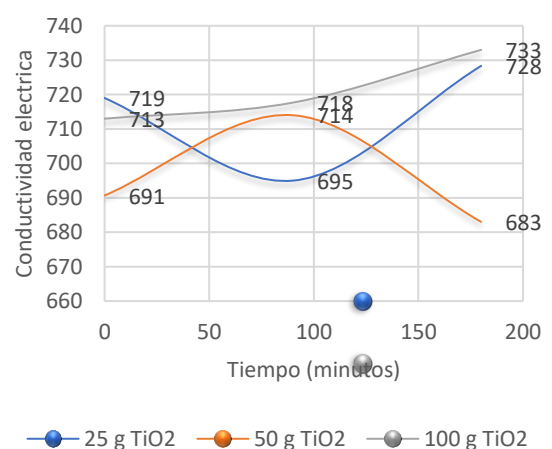
**Figura 11**

*Niveles de conductividad eléctrica en el tiempo a una concentración inicial de 0.2 mg/l en los diferentes pesos de dióxido de titanio.*



**Figura 12**

*Niveles de conductividad eléctrica en el tiempo a una concentración inicial de 2 mg/l en los diferentes pesos de dióxido de titanio.*



### Análisis de varianza para la conductividad eléctrica

Se realizó el análisis de los datos (Tabla 3), se encontró la significancia de los factores; se obtuvieron valores para p mayores a 0.05 en todos

los factores, lo cual indica que estos no son estadísticamente significativos sobre la fluctuación en los niveles de conductividad eléctrica del agua, con un 95% de nivel de confianza.

**Tabla 3**

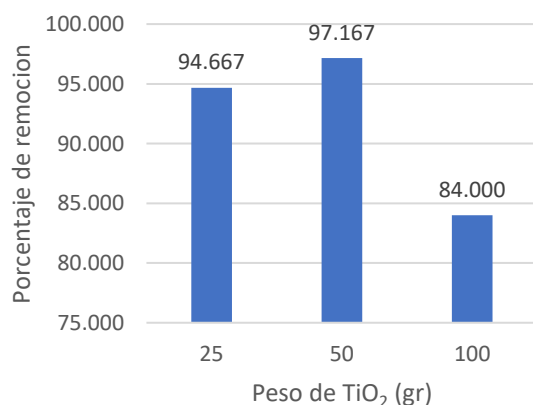
*ANVA para conductividad eléctrica del agua*

Fuente de variación	SC	GL	CM	Fc	Sig.
A: Concentración Hg	1353.185	2	676.593	0.516	0.600
B: Peso TiO <sub>2</sub>	721.407	2	360.704	0.275	0.761
C: tiempo	13.556	2	6.778	0.005	0.995
Error experimental	70866.667	54	1312.346		
Total	89248.889	80			

### Comparar las tasas de remoción final de mercurio divalente en los diferentes tratamientos

**Figura 13**

*Tasa de remoción a diferentes pesos del dióxido de titanio con concentración inicial de 0.02 mg/l de mercurio.*

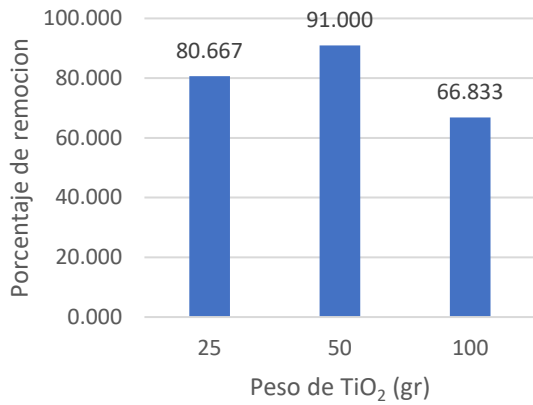


En la figura 13 se observa los niveles de remoción de mercurio divalente del agua de los tratamientos en los cuales se utilizó una concentración inicial de 0.02 mg/l de mercurio donde la mayor eficiencia se observó en la interacción con 50 gramos de TiO<sub>2</sub> con un 97.16% de remoción, seguido por la interacción de 25 gramos de TiO<sub>2</sub> con un 94.67 % de remoción.

En la figura 14 se observa los niveles de remoción de mercurio divalente del agua de los tratamientos en los cuales se utilizó una concentración inicial de 0.2 mg/l de mercurio donde la mayor eficiencia se observó en la interacción con 50 gramos de TiO<sub>2</sub> con un 91% de remoción, seguido por la interacción de 25 gramos de TiO<sub>2</sub> con un 80.67 % de remoción.

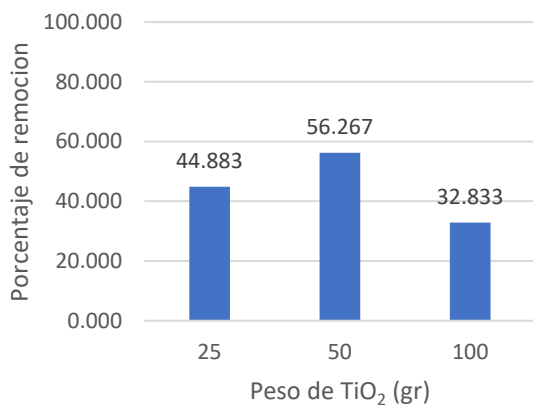
**Figura 14**

Tasa de remoción a diferentes pesos del dióxido de titanio con concentración inicial de 0.2 mg/l de mercurio.



**Figura 15**

Tasa de remoción a diferentes pesos del dióxido de titanio con concentración inicial de 2 mg/l de mercurio.



En la figura 15 se observa los niveles de remoción de mercurio divalente del agua de los tratamientos en los cuales se utilizó una concentración inicial de 2 mg/l de mercurio donde la mayor eficiencia se observó en la interacción con 50 gramos de TiO<sub>2</sub> con un 56.27% de remoción, seguido por la interacción de 25 gramos de TiO<sub>2</sub> con un 44.88 % de remoción finalmente la interacción de 100 gramos de TiO<sub>2</sub> con un 32.83 % de remoción de mercurio divalente.

**Análisis de varianza para la remoción de mercurio divalente.**

El ANVA, mostrada en la Tabla 4, se observa los valores-P que prueban la significancia estadística tanto de la concentración de mercurio inicial como la del peso de TiO<sub>2</sub> sobre la remoción de mercurio divalente (%), muestra valores-P menores que 0.05, para ambos factores y su interacción por tanto tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la remoción de mercurio divalente, con un 95.0% de nivel de confianza.

**Tabla 4**

ANVA para la remoción de Hg por efecto de la concentración Hg y peso TiO<sub>2</sub>

Fuente de variación	SC	GL	CM	Fc	Sig.
A: Concentración Hg	10812.978	2	5406.489	1294.508	<0.001*
B: Peso TiO <sub>2</sub>	1871.646	2	935.823	224.070	<0.001*
A x B	127.814	4	31.953	7.651	<0.001*
Error experimental	75.177	18	4.176		
Total	12887.614	26			





### Prueba Tukey para remoción de mercurio divalente por efecto principal del peso de $\text{TiO}_2$ .

completamente heterogénea, como se muestra en la Tabla 5.

Se determinó mediante la prueba HSD de Tukey que la comparación de la influencia de los pesos de  $\text{TiO}_2$  sobre la remoción de mercurio divalente fue

**Tabla 5**

*Prueba Tukey para la remoción de Hg por efecto del peso de  $\text{TiO}_2$*

Merito	Peso de $\text{TiO}_2$ (g)	Media de remoción de Hg (%)	Grupos Homogéneos
1	50	81.4778	a
2	25	73.4056	b
3	100	61.2222	c

## DISCUSIÓN

Carbajo (2013) y Acevedo (2015), indican que los procesos fotocatalíticos que emplean radiación solar y como fotocatalizador al  $\text{TiO}_2$ , indica que la intensidad de radiación solar ultravioleta influye linealmente en el proceso de degradación. Ambos, luz y catalizador, son necesarios para alcanzar o acelerar una reacción química. La presente investigación al emplear radiación solar la evolución de la remoción del contaminante está gobernado por la variación de la intensidad de radiación UV, la cual no es constante a lo largo del tiempo experimental. En las figuras 1, 2 y 3 se aprecia el comportamiento de la remoción del mercurio divalente en los tratamientos, en función al tiempo de operación, los cuales en los tratamientos con 50 g. de  $\text{TiO}_2$  la remoción se da de manera más rápida a diferencia de 100 g. de

$\text{TiO}_2$  que presenta una remoción del contaminante más lenta, esto es debido a la turbidez, influyendo el proceso de fotocatalisis. Carbajo (2013), también menciona que la fotocatalisis no es sensible a pequeñas variaciones de la temperatura, por lo que las etapas del proceso son fuertemente dependientes de este parámetro; en cuanto a la temperatura se puede indicar que su influencia en la fotocatalisis es poco significativa estadísticamente, como se observa en las figuras 7, 8 y 9, la cual muestra que el comportamiento de la temperatura del agua durante el proceso de fotocatalisis, la concentración inicial del contaminante ( $\text{TiO}_2$ ) y el tiempo, no ejercen influencia en los niveles de temperatura del agua, por el contrario, la variable de temperatura del agua depende directamente de parámetros ambientales. Por otro lado las figuras 10, 11 y 12 muestran los valores obtenidos de la conductividad eléctrica siendo todos estos muy fluctuantes, los cuales al

contrastarlo con la Tabla 3, se encontraron valores  $p$  mayores a 0.05 para todos los factores lo cual indica no existir significancia estadística; Colina (2012) indica que la conductividad eléctrica guarda una relación directamente proporcional con la temperatura, lo cual explica los valores obtenidos pues al estarse trabajando con radiación solar, factores como temperatura y radiación no son variables controlables afectando así los resultados en los tratamientos.

Álvarez (2011) menciona que hasta el 2009 las operaciones mineras en Madre de Dios han deforestado unas 18,000 hectáreas de bosque, contaminando con mercurio y otros metales pesados a fuentes de agua, ríos, quebradas, cochas y pantanos de palmeras, poniendo en riesgo la salud de la fauna y la flora, y de la población humana. Es una realidad, muy pocas empresas cumplen con la legislación vigente sobre EIA o declaraciones ambientales, responsabilidad social y otras; la presente investigación se tomó como punto de partida 3 diferentes concentraciones de mercurio inicial: 0.02 mg/l, 0.2 mg/l y 2 mg/l, para remover dicho contaminante el cual haciendo uso del proceso de fotocatalisis heterogénea y por un lapso de tiempo de 180 minutos se logró remover el contaminante, sin embargo de acuerdo a los resultados, la interacción de la concentración inicial del contaminante a 0.02 mg/l Hg y los pesos de 25 y 50 gramos de  $\text{TiO}_2$  con valores promedio de 0.001 mg/l y 0.0005 mg/l respectivamente se logró cumplir con lo propuesto por el Decreto Supremo 010-2010 Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes Líquidos de Actividades Minero – Metalúrgicas MINAM

(2017), el cual plantea que el valor límite es de 0.002 mg/l., de igual manera el MINAM (2017), indica Estándares de Calidad del Agua de 0.001 mg/l Hg para diversos usos.

El agua destilada contaminada artificialmente, tenía un pH de 5.9; y se observa el comportamiento de este parámetro en las figuras 4, 5 y 6 por lo que el pH con referente a la fotocatalisis tiende a descender ligeramente, pero en los tratamientos que se usó 100 g. de  $\text{TiO}_2$  el pH es mayor en comparación con los tratamientos de 25 g. y 50 g. de  $\text{TiO}_2$ . Acosta (2009), asegura que se ha demostrado que el pH tiene un efecto determinante en el proceso global y además su efecto es variable y controvertido; normalmente, el proceso de fotocatalisis es más eficiente en medio ácido ( $3 \leq \text{pH} \leq 5$ ). Sin embargo, las velocidades de reacción aumentan con altos valores de pH, puesto que en medio básico el número de radicales hidroxilos se puede incrementar en la superficie de las partículas de  $\text{TiO}_2$  por la captura de los iones hidroxilos por parte de los huecos disponibles fotoinducidos para producir radicales hidroxilos; lo cual implica que a mayor cantidad de partículas de  $\text{TiO}_2$ , mayores serán los niveles de pH, pudiéndose ver afectada la tasa de remoción tal como se observa en los resultados de los tratamientos que se interactuó con 100 g.  $\text{TiO}_2$ , que fue la cantidad que obtuvo mayores valores niveles de pH y a su vez obtuvo una tasa de remoción baja en comparación a los demás tratamientos.

Colina (2012) y Domènech et al. (2004), indican que a elevadas concentraciones del catalizador, provocan efectos de apantallamiento en los que se reduce el área superficial expuesta a

la radiación incidente y así mismo la fotocatalisis; las figuras 13, 14 y 15 muestran la tasa de remoción final del mercurio divalente, el tratamiento de 25 g. de  $\text{TiO}_2$  para todas las concentraciones iniciales de mercurio con valores de remoción al 94.66%, 80.67% y 44.88% respectivamente, para los tratamientos que interactuaron con 50 g. del  $\text{TiO}_2$  para todas las concentraciones iniciales de mercurio con valores de remoción al 97.17%, 91% y 56.27% respectivamente, mientras que el tratamiento de 100 g. de  $\text{TiO}_2$  para todas las concentraciones iniciales de mercurio con valores de remoción al 84%, 66.83% y 32.83% respectivamente; concluyendo así que el peso de fotocatalizador  $\text{TiO}_2$  si influye en la remoción del contaminante no obstante al observarse mayor remoción en los tratamientos de 50 g., sin embargo los tratamientos con 100 g. de  $\text{TiO}_2$  mostraron apantallamiento, reduciendo los niveles de remoción esperados. Por otro lado, Córdova (2013) asegura que la fotocatalisis es más eficiente cuanto menor es la concentración del contaminante, concordando así con los resultados del trabajo de investigación, esto es debido al porcentaje de remoción obtenido, donde que con la concentración inicial del mercurio (0.02 mg/l de Hg), se han obtenido niveles más altos de remoción, que con los demás tratamientos. De acuerdo los análisis de varianza y a las pruebas Tukey, la concentración inicial del contaminante, peso de  $\text{TiO}_2$  y tiempo ejercen fuerte influencia en la remoción de mercurio divalente.

## CONCLUSIONES

Existe influencia del peso del  $\text{TiO}_2$  en la remoción de mercurio divalente, explicándose que el apantallamiento del catalizador reduce la tasa de remoción.

La tasa de remoción en el tiempo de operación es dependiente de la variación de la intensidad de radiación UV la cual no es constante a lo largo de 180 minutos y también por la cantidad de  $\text{TiO}_2$ .

La tasa de remoción se ve influenciada por la cantidad de  $\text{TiO}_2$ , afectando así a los parámetros de pH y conductividad eléctrica que guardan una relación inversamente proporcional mientras que la temperatura una relación directa.

Los tratamientos con mayor tasa de remoción fueron aquellos en los que se trabajó con 50 g. de  $\text{TiO}_2$ .

## REFERENCIAS

### BIBLIOGRÁFICAS

Acevedo Dávila, A.L. (2015). Estudio de la fotocatalisis heterogénea solar para tratar un efluente contaminado con productos farmacéuticos: ibuprofeno, diclofenaco y sulfametoxazol [Tesis de Título, Escuela Politécnica Nacional – Ecuador]. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/10366/3/CD-6165.pdf>.

- Acosta García, L. (2009). Proceso fotofenton de oxidación química para el tratamiento de aguas industriales [Tesis de Título, Universidad Carlos III de Madrid]. [https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/8256/PFC\\_Luis\\_Acosta\\_Garcia.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/8256/PFC_Luis_Acosta_Garcia.pdf?sequence=1&isAllowed=y).
- Brack, A., Ipenza, C., Álvarez, J., Sotero, V. (2011). Minería Aurífera en Madre de Dios y Contaminación con Mercurio – Una Bomba de Tiempo. Instituto de la Amazonía Peruana y Ministerio del Ambiente. [http://siar.minam.gob.pe/puno/sites/default/files/archivos/public/docs/mineria\\_aurifera\\_en\\_madre\\_de\\_dios.pdf](http://siar.minam.gob.pe/puno/sites/default/files/archivos/public/docs/mineria_aurifera_en_madre_de_dios.pdf).
- Carbajo Olleros, J. (2013). Aplicación de la fotocatalisis solar a la degradación de contaminantes orgánicos en fase acuosa con catalizadores nano-estructurados de TiO<sub>2</sub> [Tesis de Título, Universidad Autónoma de Madrid - España]. [https://digital.csic.es/bitstream/10261/100081/1/Carbajo%20Olleros,%20J.%20Tesis\\_2013.pdf](https://digital.csic.es/bitstream/10261/100081/1/Carbajo%20Olleros,%20J.%20Tesis_2013.pdf).
- Córdova Villegas, L. G. (2013). Desinfección y remoción de arsénico del agua por fotocatalisis heterogénea [Tesis de Maestría, Centro de investigación en materiales avanzados]. <https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/404/1/Tesis%20Laura%20Gabriela%20C%C3%B3rdova%20Villegas.pdf>.
- Decreto Supremo N°004-2017-MINAM de 2017. Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecen Disposiciones Complementarias. 07 de junio del 2017. <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/06/DS-004-2017-MINAM.pdf>. 07 junio del 2017.
- Díaz Dumont, J. R. (2018). Políticas públicas en propiedad intelectual escrita. Una escala de medición para educación superior del Perú. *Revista Venezolana De Gerencia*, 23(81), 88-105. <https://produccioncientificaluz.org/index.php/rvg/article/view/23470/23679>.
- Domènech, X., Jardim W., Litter, M. (2004). Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes en eliminación de contaminantes por fotocatalisis heterogénea. Editorial Miguel Blesa. [https://www.researchgate.net/publication/237764122\\_Procesos\\_avanzados\\_de\\_oxidacion\\_para\\_la\\_eliminacion\\_de\\_contaminantes](https://www.researchgate.net/publication/237764122_Procesos_avanzados_de_oxidacion_para_la_eliminacion_de_contaminantes).
- Leguizamón, J., Quiñones, C., Espinosa, H., Sarria, V. (2010). Fotosensibilización de TiO<sub>2</sub> con un colorante comercial para fotodegradación de contaminantes orgánicos en agua. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica* 13 (2): 185-190, Universidad de América - Colombia. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0123-42262010000200021](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-42262010000200021).

León Tapia, I. M. (2016). Evaluación de la medicago sativa l (alfalfa), Cecropia peltata l (guarumo) y Arachis pintoi w.c (maní forrajero) como potenciales especies fitorremediadoras para remediación de suelos contaminados por minería aurífera en las riberas del río Nambija, Barrio Puente Azul, Cantón Zamora [Tesis de Título, Universidad Nacional de Loja - Ecuador]. <https://dspace.unl.edu.ec/jspui/handle/123456789/14131>.

López Pamo, J., Aduvire, O., Baretino, D. (2012). Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: estado actual y perspectivas de futuro. Boletín Geológico y Minero. Lima, Perú. [http://www.igme.es/boletin/2002/113\\_1\\_2002/4-articulo%20tratamientos.pdf](http://www.igme.es/boletin/2002/113_1_2002/4-articulo%20tratamientos.pdf)

Petro Utria, J., García Maestre, K. (2012). Evaluación del modelo y simulación de un reactor fotocatalítico solar de placa plana aplicado a la descontaminación de efluentes agroindustriales [Tesis de Título, Universidad de Cartagena]. <https://repositorio.unicartagena.edu.co/bitstream/handle/11227/81/Proyecto%20Placa%20Plana.pdf;jsessionid=36AAD8A8471860DD2AE47C2264E31E10?sequence=1>.

Solís Arcos, Y. (2013). Remoción del compuesto emergente carbamazepina mediante fotocátalisis heterogénea con TiO<sub>2</sub> [Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México - México]. <http://132.248.9.195/ptd2013/mayo/0693163/Index.html>

#### **CORRESPONDENCIA:**

Mario Andrée Martínez Trujillo  
[andree\\_mt23@hotmail.com](mailto:andree_mt23@hotmail.com)

