

Bioremediation of DAM: Adsorption of copper, iron and mercury using *Chondracanthus chamissoi*.

César Arévalo-Aranda, Dr.¹; Aldo Castillo Chung, Msc.²; Alexander Vega Anticona, Dr.³; Randall Gutiérrez-Chilca, Msc.⁴; Rudy Espinoza-Nima, Msc.⁵; Ángel Carrasco-Porras, Msc.⁶; Iván Reyes López, Dr.⁷*

^{1,4}Departamento de Ciencias, Universidad Privada del Norte, Perú, cesar.arevalo@upn.edu.pe; randall.gutierrez@upn.edu.pe

^{2,7}Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Universidad Nacional de Trujillo, Perú, alrocas@unitru.edu.pe; ireyes@unitru.edu.pe

³Departamento de Ingeniería de Materiales, Universidad Nacional de Trujillo, Perú, avega@unitru.edu.pe

^{5,6}Departamento de Física, Universidad Nacional de Piura, Perú, respinozan@unp.edu.pe; acarrascop@unp.edu.pe

*corresponding author:

ireyes@unitru.edu.pe

[Av. Juan Pablo s/n, Phone 044 633952](mailto:ireyes@unitru.edu.pe)

Abstract— In the present investigation, the adsorption of copper, iron and mercury in solution with concentrations of 100, 300 and 500 ppm was evaluated in the seaweed Chondracanthus chamissoi "cochayuyo" during agitation times of 2, 4 and 6 hours, following the multiple factorial design and according to the analysis of variance of the data obtained as results, the most significant variable was the agitation time, which corresponded to a first order kinetics of adsorption of metals in solution in the seaweed. The least significant variable was the concentration of the test solutions. The metals copper, iron and mercury dissolved in the same volume of solution were adsorbed in higher amount when the algae weight was lower, compared to the lower amount adsorbed for higher algae weight. There was not much difference between the adsorption rate behavior by the algae at the same test conditions, being first iron, then very close copper and then mercury. The highest average weight of copper, iron and mercury deposited on Chondracanthus chamissoi was 78.4, 85.6 and 70.8 µg/g of algae respectively and corresponded to an agitation time of 6 hours, with 10 g of algae in the column and 500 ppm of copper, iron and mercury solution respectively. The lowest average weight of copper, iron and mercury deposited on Chondracanthus chamissoi was 43.8, 38.8 and 32.6 µg/g of algae respectively and corresponded to an agitation time of 2 hours, with 30 g of algae in the column and 100 ppm in copper, iron and mercury solution respectively. Based on these results, which show the feasibility of adsorption of metals present in a solution on the surface of the algae, biofilters with Chondracanthus chamissoi can be used for the treatment of Acid Mine Drainage (AMD), effluents from artisanal or other mining activities that generate liquid waste with the presence of heavy metals, designing the appropriate equipment for the treatment of effluents containing these dissolved metals, using Chondracanthus chamissoi as a biosorbent.

Keywords— Bioremediation, metals, Chondracanthus chamissoi

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

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

DO NOT REMOVE

Biorremediación de DAM: Adsorción de cobre, hierro y mercurio empleando *Chondracanthus chamissoi*

César Arévalo-Aranda, Dr.¹; Aldo Castillo Chung, Msc.²; Alexander Vega Anticona, Dr.³; Randall Gutiérrez-Chilca, Msc.⁴; Rudy Espinoza-Nima, Msc.⁵; Ángel Carrasco-Porras, Msc.⁶; Iván Reyes López, Dr.⁷*

^{1,4}Departamento de Ciencias, Universidad Privada del Norte, Perú, cesar.arevalo@upn.edu.pe; randall.gutierrez@upn.edu.pe

^{2,7}Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Universidad Nacional de Trujillo, Perú, alrocas@unitru.edu.pe; ireyes@unitru.edu.pe

³Departamento de Ingeniería de Materiales, Universidad Nacional de Trujillo, Perú, avega@unitru.edu.pe

^{5,6}Departamento de Física, Universidad Nacional de Piura, Perú, respinozan@unp.edu.pe; acarrascop@unp.edu.pe

*corresponding author:

ireyes@unitru.edu.pe

Av. Juan Pablo s/n, Phone 044 633952

Resumen— En la presente investigación se evaluó la adsorción de cobre, hierro y mercurio en solución con concentraciones de 100, 300 y 500 ppm en el alga *Chondracanthus chamissoi* “cochayuyo” durante tiempos de agitación de 2, 4 y 6 horas, siguiendo el diseño factorial múltiple y de acuerdo al análisis de varianza de los datos obtenidos como resultados, la variable más significativa fue el tiempo de agitación, que correspondió a una cinética de primer orden de adsorción de metales en solución en el alga. La variable menos significativa fue la concentración de las soluciones de prueba. Los metales cobre, hierro y mercurio disueltos en el mismo volumen de solución se adsorbieron en mayor cantidad cuando el peso del alga fue menor, comparado con la menor cantidad adsorbida para un peso mayor de alga. No hubo mucha diferencia entre el comportamiento de velocidad de adsorción por el alga a las mismas condiciones de pruebas, siendo primero hierro, luego muy cerca cobre y posteriormente mercurio. El mayor peso promedio de cobre, hierro y mercurio depositado sobre *Chondracanthus chamissoi*, fue de 78.4, 85.6 y 70.8 µg/g de alga respectivamente y correspondió a un tiempo de agitación de 6 horas, con 10 g de alga en la columna y a 500 ppm de solución de cobre, hierro y mercurio respectivamente. El menor peso promedio de cobre, hierro y mercurio depositado sobre *Chondracanthus chamissoi*, fue de 43.8, 38.8 y 32.6 µg/g de alga respectivamente y correspondió a un tiempo de agitación de 2 horas, con 30 g de alga en la columna y a 100 ppm en solución de cobre, hierro y mercurio respectivamente. En base a estos resultados, que muestran la factibilidad de adsorción de metales presentes en una solución, sobre la superficie del alga, se pueden emplear biofiltros con *Chondracanthus chamissoi* para el tratamiento de Drenajes Ácidos Mineros (DAM), efluentes de actividades mineras artesanales o de otro tipo, que generen residuos líquidos con presencia de metales pesados diseñándose el equipo adecuado para el tratamiento de efluentes que contengan estos metales disueltos, empleando *Chondracanthus chamissoi* como biosorbente.

Palabras claves—Biorremediación, metales, *Chondracanthus chamissoi*

I. INTRODUCCIÓN

El drenaje ácido de mina (DAM), se refiere a los depósitos y relaves generados por la exploración del sitio de la mina. Estos depósitos y relaves pueden estar expuestos al ambiente natural (agua, aire y actividad microbiana) y desarrollar condiciones ácidas que conducen a la lixiviación de metales y metaloides (por ejemplo, Fe, Al, Zn, Cu, Cd, Pb, Hg, Ni, Co, Cr, As, Sb) [1, 2]. En general, el DAM proviene de dos fuentes principales [3]: 1) Las fuentes primarias, las cuales incluyen vertederos de rocas mineras, embalses de relaves, trabajos mineros subterráneos y también a cielo abierto, agua subterránea bombeada y con descarga natural, así como rocas de construcción; 2) Las fuentes secundarias incluyen estanques de lodos de tratamiento, cortes de roca y pilas de almacenamiento.

El DAM es perjudicial para los seres humanos, los animales, las plantas y la vida acuática [4, 5]. Por ejemplo, el DAM causa la muerte de los peces al afectar la función de las branquias, y el aumento de la turbidez por la erosión del suelo y la acumulación de precipitaciones en el lecho del río puede cambiar el hábitat de los organismos acuáticos [4, 5]. Algunos metales producidos por la industria minera, como Cd, Pb, Cu, Zn, Ni y Hg, pueden acumularse en el cuerpo humano y causar enfermedades graves. Por ejemplo, los altos niveles de Hg en el cuerpo pueden causar la enfermedad de Minamata, una enfermedad neurológica que puede causar entumecimiento, debilidad muscular e incluso la muerte. Los niveles elevados de Ni pueden causar tos seca, dolor de pecho y náuseas. Altos niveles de Pb en humanos pueden dañar el sistema nervioso y causar discapacidad intelectual, y altos niveles de Zn en el cuerpo humano pueden causar vómitos, inflamación de la piel y fiebre [6]. La biología de las plantas y la vida acuática también puede verse afectada por la toxicidad de los metales. Además, estos organismos no solo actúan como receptores de la contaminación, sino también como una vía hacia los humanos

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

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

DO NOT REMOVE

a través de las cadenas alimentarias [5]. Incluso si la contaminación proviene de una sola fuente puntual, los impactos no se limitan al área local, sino que también pueden afectar regiones distantes, ya que el agua puede transportar la contaminación a lo largo de ríos o arroyos [4, 5].

La industria minera ha jugado un papel vital en las economías de muchos países y ha apoyado su desarrollo durante mucho tiempo. La producción total anual de minerales a nivel mundial entre 2013 y 2017 fue de aproximadamente 17000 millones de TM [7] En particular, EE. UU., China, Rusia, Australia e India son los cinco principales países en la industria minera [8]. Por ejemplo, en 2017, China y EE. UU. produjeron 4100 y 2000 millones de TM de minerales, respectivamente [8]. Si bien el Reino Unido no se encuentra, en la actualidad, en la lista de los principales productores, sin una industria minera de metales activa, tiene una rica historia minera como cuna de la revolución industrial y, por lo tanto, tiene un legado de minas antiguas con DAM asociado todavía. afectando amplias zonas del país. Algunos sitios mineros abandonados en el Reino Unido todavía contribuyen significativamente a la contaminación de ríos y arroyos con metales pesados [9]. Por ejemplo, la mina de cobre Parys Mountain en la isla galesa de Anglesey descarga 24 toneladas de Zn y 10 toneladas de Cu al mar de Irlanda cada año [9]. Debido a estos sitios mineros abandonados, 315 de los 7816 cuerpos de agua en el Reino Unido, lo que equivale a 2840 km de ríos, están contaminados o potencialmente contaminados por DAM [7, 9, 10]

Existen varios métodos establecidos para el tratamiento de los DAM, como la precipitación, el intercambio iónico, la electroquímica y la separación por membrana [11, 12, 13]. Por ejemplo, el método de canales abiertos de piedra caliza utiliza un canal lleno de fragmentos de piedra caliza para neutralizar y aumentar la alcalinidad de los DAM [11]. Los drenajes de piedra caliza anóxica son líneas de drenaje de piedra caliza enterradas con una pendiente suave, selladas con un revestimiento de baja permeabilidad y cubiertas con arcilla para garantizar que el aire no fluya hacia el drenaje durante la operación [13]. Estos tratamientos tienen ventajas, incluido el bajo costo y la facilidad de manejo; sin embargo, también tienen ciertas limitaciones, por ejemplo, la necesidad de una gran cantidad de caliza y también la generación de una gran cantidad de lodos (contaminación secundaria), la baja eficacia, la imposibilidad de eliminar todos los metales/metaloideos y la necesidad de un área relativamente grande [1, 11, 14]. Por lo tanto, los enfoques de tratamiento de base biológica para los DAM deben considerarse una alternativa atractiva debido a su mayor eficiencia, menor contaminación secundaria y costos potencialmente más bajos [15].

El tratamiento de base biológica generalmente se refiere al uso de biomasa muerta/procesada o viva para reducir y eliminar los metales pesados de los DAM [15]. Los materiales de base biológica comunes y adecuados suelen incluir algas, biocarbón y bacterias [16, 17, 18]. Está comprobado que cada uno de estos tres tratamientos puede eliminar los metales de DAM de manera efectiva y rentable. Sin embargo, los principales cuellos de

botella de estos tres tratamientos de los DAM son la falta de tratamiento industrial del agua, estudios de DAM. para algas, el uso de tecnologías rudimentarias en el reciclaje de biocarbón y la recuperación de metales del biocarbón, y la necesidad de fuentes de carbono altamente efectivas para preparar bacterias reductoras de sulfato (SRB) inmovilizadas [19, 20, 21].

En el caso de la presente investigación se utilizó como especie vegetal al *Chondracanthus chamissoi*, conocido como cochayuyo, por la facilidad de encontrarse en las playas del litoral de la región La Libertad - Perú; de esta forma, el objetivo de la presente investigación fue determinar el efecto del tiempo de agitación, a diferentes concentraciones de cobre, hierro y mercurio y con diferentes concentraciones de *Chondracanthus chamissoi* sobre la concentración de cobre, hierro y mercurio; en el tratamiento de DAM preparado en laboratorio.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Materiales

A.1. Muestras de solución de cobre, hierro y mercurio

Las muestras de la solución conteniendo cobre, hierro y mercurio fueron preparadas en el laboratorio de Procesamiento de Minerales del Departamento de Ingeniería Metalúrgica, de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad Nacional de Trujillo y los reactivos químicos de grado Q.P. usados fueron: Cobre (II) cloruro-2-hidrato, Hierro (III) cloruro-6-hidrato, Mercurio (II) cloruro.

En la tabla I se encuentran las diversas concentraciones de cobre, hierro y mercurio preparados en el laboratorio para ser sometidos a los diversos ensayos experimentales

TABLA I
COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS SOLUCIONES DE COBRE, HIERRO Y MERCURIO

Compuesto químico	Concentración (ppm)
Cobre	100, 300 y 500
Hierro	100, 300 y 500
Mercurio	100, 300 y 500

A.2. Adecuación de las muestras de *Chondracanthus chamissoi*

Las algas fueron recolectadas manualmente del puerto de Salaverry ubicado con coordenadas de 08° 14' 12" S y 78° 57' 20" W (fig.1), entre el muelle y 1 km al sur.



Fig. 1 Ubicación del puerto de Salaverry

Se lavaron las algas con agua fresca y posteriormente con ácido clorhídrico 0,1 N y se enjuagaron 5 veces con abundante agua desionizada, para luego extenderlas y secar, como se muestra en la fig.2. De estas algas se tomó pesos de 10, 20 y 30 g para colocarlas para cada prueba.



Fig. 2 Algas *Chondracanthus chamissoi*.

B. Instrumentos y consumibles

Para pesar los reactivos y algas se empleó una balanza Sartorius BP 301S de sensibilidad 0,1 mg y para mantener homogénea la concentración de metales en solución durante cada prueba por el tiempo de 2, 4 y 6 horas se usó un agitador magnético CAT M6 el cual se visualiza en la fig. 3.

Se usaron vasos de 1000 mL para preparar las soluciones y para 100 ppm de cobre, hierro y mercurio se adicionaron 0,2683 g de cobre (II) cloruro-2hidrato, 0,4871 g de Hierro (III) cloruro-6-hidrato y 0,1353 g de mercurio (II) cloruro y se aforó con agua destilada a 1L; para las concentraciones de 300 ppm y 500 ppm de cobre, hierro y mercurio, se usaron respectivamente pesos triples y quintuples de los mismos reactivos.



Fig. 3. Agitador magnético CAT M6 con muestra de *Chondracanthus Chamissoi*

B. Métodos y técnicas

Se emplearon columnas de vidrio con capacidad para 500 mL de muestra de solución y en su interior en forma concéntrica se acopló la malla de acero inoxidable y entre ésta y la columna se distribuyó el peso de algas que correspondió para cada prueba.

La primera variable independiente fue el tipo de metal disuelto en la solución muestra y sus niveles corresponde a cobre, hierro y mercurio. La segunda variable independiente fue la concentración de los metales en la solución muestra y sus tres niveles fueron 100, 300 y 500 ppm para cada uno de ellos. La tercera variable independiente fue el peso de algas *Chondracanthus chamissoi* y sus niveles de experimentación con 10, 20 y 30 g y la cuarta variable independiente fue el tiempo de agitación o contacto de la solución muestra con las algas con los tres niveles de 2, 4 y 6 h.

La variable dependiente fue el peso de metal adsorbido en $\mu\text{g/g}$ de alga.



Fig.4. Malla de acero inoxidable que empaqueta a *Chondracanthus chamissoi*.

Se tomaron estas concentraciones por ser parecidas a las que presentan los efluentes de la minería artesanal, como 500 ppm de mercurio, con lo cual los resultados se ajustaron a la realidad problemática.

Para la experimentación se aplicó un diseño factorial con cuatro variables y tres niveles para cada variable y una repetición de todas las pruebas [22].

Cada una de las 162 pruebas se inició empaquetando la columna con las algas de *Chondracanthus chamissoi* y con 500 mL de solución muestra y se mantuvo en agitación por el tiempo correspondiente a cada prueba, al cabo del cual se muestreó la solución y el alga y fueron analizadas por absorción atómica por cobre, hierro y mercurio.

La contrastación de los resultados se hizo con análisis de varianza (ANOVA) y la prueba F de Fisher Snedecor para la determinación de la significancia de las cuatro variables independientes, cada una con tres niveles y la interacción entre 2 variables, entre 3 variables y entre las 4 variables para lo cual se empleó el programa Statistical Package for the Social Sciences SPSS para Windows V.12.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Luego de realizadas las pruebas, se organizó los datos relacionados a la influencia de cada variable sobre el peso de metal adsorbido por las algas, encontrándose que el mayor peso promedio de cobre depositado sobre *Chondracanthus chamissoi*, fue de 78,4 $\mu\text{g/g}$ de alga correspondiente a un tiempo de agitación de 6 horas, con 10 g de alga en la columna y a 500 ppm de cobre en solución. Asimismo, el menor peso promedio de cobre adsorbido por las algas fue de 43,8 $\mu\text{g/g}$ de alga y correspondió a un tiempo de agitación de 2 horas, con 30 g de alga en la columna y a 100 ppm de cobre en solución.

El mayor peso promedio de hierro depositado sobre *Chondracanthus chamissoi* fue de 85,6 $\mu\text{g/g}$ de alga y correspondió a un tiempo de agitación de 6 horas, con 10 g de alga en la columna y a 500 ppm de hierro en solución. Asimismo, el menor peso promedio de hierro adsorbido por las algas fue de 38,8 $\mu\text{g/g}$ de alga y correspondió a un tiempo de agitación de 2 horas, con 30 g de alga en la columna y a 100 ppm de hierro en solución.

El mayor peso promedio de mercurio depositado sobre *Chondracanthus chamissoi* fue de 70,8 $\mu\text{g/g}$ de alga y correspondió a una agitación de 6 horas, con 10 g de alga en el agitador y a 500 ppm de mercurio en solución. En tanto, el menor peso promedio de mercurio adsorbido sobre las algas fue de 32,6 $\mu\text{g/g}$ de alga y correspondió a un tiempo de agitación de 2 horas, con 30 g de alga en la columna y a 100 ppm de mercurio en solución.

Los resultados de la corrida experimental de la adsorción de cobre, hierro y mercurio empleando 10 g de algas se observan en la fig. 5

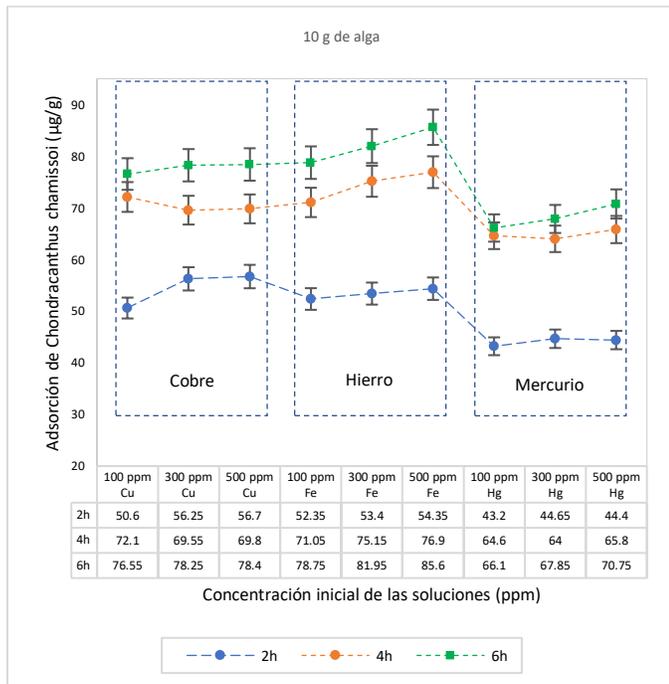


Fig. 5. adsorción de cobre, hierro y mercurio empleando 10 g de algas

En la fig. 6 se observan los resultados del diseño experimental de la adsorción de cobre, hierro y mercurio empleando 20 g de algas

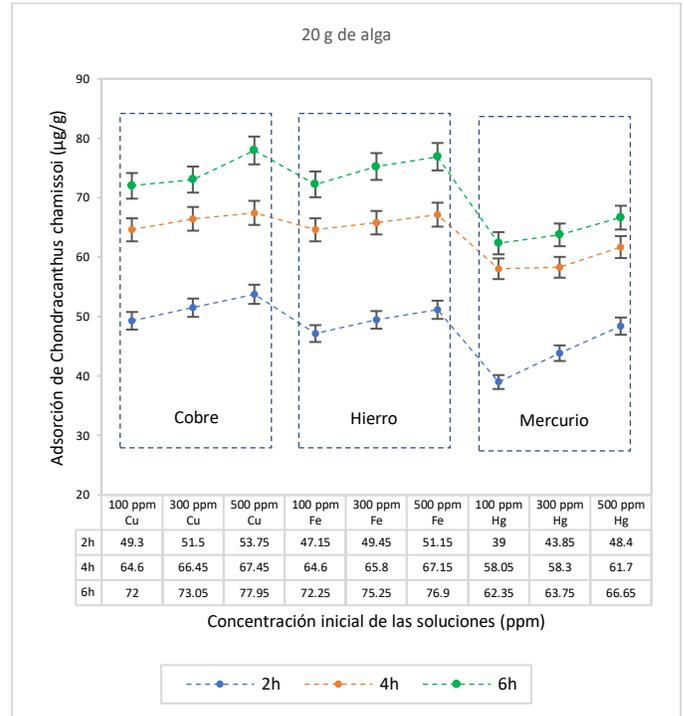


Fig. 6. adsorción de cobre, hierro y mercurio empleando 20 g de algas

En la fig. 7 se observan los resultados del diseño experimental de la adsorción de cobre, hierro y mercurio empleando 30 g de algas

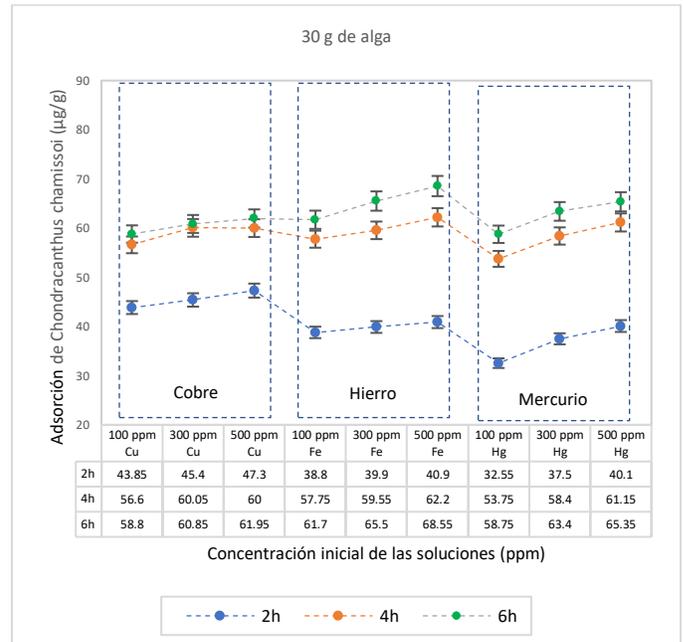


Fig. 7. adsorción de cobre, hierro y mercurio empleando 30 g de algas

La variable tiempo de agitación, con soluciones de 100, 300, 500 ppm de cobre y pesos de 10 g (fig. 5), 20 g (fig. 6) y 30 g (fig. 7) de *Chondracanthus chamissoi* muestra mejores resultados para el cobre adsorbido en $\mu\text{g/g}$ de alga a medida que se incrementa el tiempo de agitación.

La variable tiempo de agitación, con soluciones de 100, 300, 500 ppm de hierro y pesos de 10 g (fig.5), 20 g (fig. 6) y 30 g (fig. 7) de *Chondracanthus chamissoi* muestra mejores resultados para el hierro adsorbido en $\mu\text{g/g}$ de alga a medida que se incrementa el tiempo de agitación.

La variable tiempo de agitación, con soluciones de 100, 300, 500 ppm de mercurio y pesos de 10 g (fig. 5), 20 g (fig. 6) y 30 g (fig. 7) de *Chondracanthus chamissoi* muestra mejores resultados para el mercurio adsorbido en $\mu\text{g/g}$ de alga a medida que se incrementa el tiempo.

La variable peso de *Chondracanthus chamissoi*, con soluciones de 100, 300, 500 ppm de cobre y tiempos de 2h, 4h y 6h de agitación (fig.5, fig.6, fig.7), muestra mejores resultados para el cobre adsorbido en $\mu\text{g/g}$ de alga a medida que se tiene menor peso de alga.

La variable peso de *Chondracanthus chamissoi*, con soluciones de 100, 300, 500 ppm de hierro y tiempos de 2h, 4h y 6h (fig.5, fig.6, fig.7) de agitación, muestra mejores resultados para el hierro adsorbido en $\mu\text{g/g}$ de alga a medida que se tiene menor peso de alga.

La variable peso de *Chondracanthus chamissoi*, con soluciones de 100, 300, 500 ppm de mercurio y tiempos de 2h, 4h y 6h (fig.5, fig.6, fig.7) de agitación, muestra mejores resultados para el mercurio adsorbido en $\mu\text{g/g}$ de alga a medida que se tiene menor peso de alga.

La variable tipo de metal en solución, a concentraciones de 100 ppm, 300 ppm y 500 ppm de metal, con pesos de 10, 20 y 30 gramos de *Chondracanthus chamissoi* y tiempos de 2, 4 y 6 horas de agitación muestra mejores resultados para dichos metales adsorbidos en $\mu\text{g/g}$ de alga a medida que se tiene mayor concentración de metal, lo cual se observa en las fig.5, fig.6 y fig.7.

La variable concentración de metal en la solución en ppm, con pesos de 10, 20 y 30 gramos de *Chondracanthus chamissoi* y tiempos de 2 h, 4 h y 6 h de agitación, muestra pequeñas mejoras en los resultados para dichos metales adsorbidos en $\mu\text{g/g}$ de alga a medida que se tiene mayor concentración de metal, lo cual se observa en las fig.5, fig.6 y fig.7.

De acuerdo al diseño experimental, realizado con un nivel de confianza de 95 % , para el análisis de varianza de los resultados obtenidos en μg de metal adsorbidos por g de *Chondracanthus chamissoi*, se encontró que el tiempo de agitación (F4) presentó el más alto valor de Fisher (14084.15); el segundo nivel de significancia (3124.918) correspondió a la variable de estudio peso de alga (F3) en la columna, en tanto el tercer nivel de significancia (1439.258) fue para la variable de estudio tipo de metal (F1) disuelto en solución y el cuarto nivel en significancia (422.537) fue para la variable de estudio concentración de metal disuelto en solución (F2) en unidades de ppm.

Las interacciones entre 2, 3 y 4 factores de estudio fueron significativos, aunque presentaron un menor nivel de importancia, dados por el efecto de arrastre de los factores independientes de alto valor F_{calc} . (Tabla II).

TABLA II
ANÁLISIS DE VARIANZA DE LOS VALORES DE COBRE, HIERRO, MERCURIO ADSORBIDOS POR EL ALGA *CHONDRACANTHUS CHAMISSOI* DESDE SUS SOLUCIONES PARA EL EXPERIMENTO FACTORIAL

Fuente	Suma de cuadrados	G L	F _{calc.}	p
Modelo corregido	22884.446(a)	80	499.741	.000
Intersección	587395.519	1	1026184.342	.000
F1 Metal tipo	1647.683	2	1439.258	.000
F2 Concentración metal en ppm	483.727	2	422.537	.000
F3 Peso de alga	3577.452	2	3124.918	.000
F4 Tiempo de contacto	16126.033	2	14086.150	.000
F1 Metal * F2 ppm	16.766	4	7.323	.000
F1 Metal * F3 Alga	369.051	4	161.184	.000
F2 ppm * F3 Alga	24.635	4	10.760	.000
F1 Metal * F2 ppm * F3 Alga	36.062	8	7.875	.000
F1 Metal * F4 Tiempo	223.662	4	97.685	.000
F2 ppm * F4 Tiempo	17.242	4	7.530	.000
F1 Metal * F2 ppm * F4 Tiempo	29.536	8	6.450	.000
F3 Alga * F4 Tiempo	111.997	4	48.915	.000
F1 Metal * F3 Alga * F4 Tiempo	147.532	8	32.217	.000
F2 ppm * F3 Alga * F4 Tiempo	18.057	8	3.943	.001
F1 Metal * F2 ppm * F3 Alga * F4 Tiempo	55.011	16	6.007	.000
Error	46.365	81		
Total	610326.330	162		
Total, corregida	22930.811	161		

Las algas tienen diferentes comportamientos relacionados con la capacidad de adsorber metales disueltos en solución y esta característica es fundamental para diseñar un tratamiento para un determinado efluente, en función de su contenido y concentración de metales disueltos. Para el caso estudiado, se empleó el alga *Chondracanthus chamissoi*, de relativa abundancia en el litoral norteño.

El hierro fue el metal que presentó mayor velocidad de adsorción sobre el alga, lo que concuerda con los resultados mostrados en la investigación realizada por Carolin et al. [6] y se debe a la facilidad de este metal para formar ligandos, por sobre la capacidad mostrada por el cobre, en tanto el mercurio tiene menos probabilidad de hacerlo por su alta densidad, que desfavorece la atracción entre dipolos y su mayor energía interfacial comparativa con el cobre y el hierro.

El tiempo de contacto del alga con la solución que contiene los metales disueltos cobre, hierro y mercurio fue la variable de mayor significancia, de acuerdo al análisis de varianza mostrado. A medida que transcurre el tiempo de agitación, el alga tiene alta velocidad de adsorción, que se muestra en la concentración que adquiere a las primeras 2 horas, y a partir de allí disminuye proporcionalmente para el cobre, hierro y mercurio adsorbidos sobre el alga, mostrando una velocidad de adsorción de primer orden en todos los casos, que es establecido por Bird et al [23]

El peso del alga fue la segunda variable en nivel de significancia y se muestra así en el análisis de varianza. El peso total de cobre, hierro y mercurio adsorbidos en las algas fueron mayores para un mayor peso total de algas, debido a la relación

directa entre mayor peso de alga y mayor superficie de exposición para la adsorción de metales desde la solución. Sin embargo, por cada gramo de algas, se adsorbe mayor cantidad de metales cuando se tiene un menor peso total de algas.

Esto se explica porque el fenómeno de adsorción estuvo regido por las leyes de la difusión tal como lo expresa Bird et al [23] y tiene como principal variable la concentración de los metales en la solución y entonces la velocidad de adsorción de los metales sobre la superficie de las algas es función de la concentración de los metales presentes en la solución.

Al inicio, para los tres pesos totales de algas se tuvo similar velocidad de adsorción de metales, pero, a medida que transcurrió el tiempo de agitación los metales se adsorbieron sobre las superficies disponibles, por lo que se infiere que, en el caso de mayor peso de algas, también hubo mayor superficie disponible para la adsorción de metales, por lo que hubo mayor cantidad de metales adsorbidos en este mayor peso total de algas.

Por tanto, en la solución quedó una menor concentración de metales y de acuerdo a la ley de difusión planteada por Bird et al [23] a medida que hubo menor concentración de metales en solución, la velocidad de adsorción de metales sobre la superficie del alga disminuyó y entonces, a medida que transcurrió el tiempo, para el caso de mayor peso total de algas, la velocidad de adsorción de metales sobre las algas fue menor.

En consecuencia, el peso de metales adsorbidos por cada peso unitario de algas fue disminuyendo a medida que el peso total de algas fue mayor.

La clase de metal disuelto en la solución fue la tercera variable en importancia. Sin embargo, entre cobre y hierro el comportamiento fue muy parecido, debido probablemente a sus semejanzas en peso atómico, densidad, configuración electrónica y propiedades químicas que al interactuar con el alga permitieron una velocidad de adsorción también parecida. El mercurio, tuvo propiedades muy distantes a los metales anteriores por lo que su comportamiento diferente quedó mostrado en la comparación de efectos entre cobre, hierro y mercurio disueltos.

La variable concentración de metales en solución (F2), de acuerdo al análisis de varianza mostrado, fue la de menor significancia. La comparación estadística de efectos entre las tres diferentes concentraciones de la solución, indicó que, efectivamente, no hubo mucha diferencia en experimentar con soluciones de 100, 300 ó 500 ppm del metal correspondiente. Esto se debió a que las tres concentraciones mostradas para el experimento luego de concluido éste, dieron concentraciones de residuo con una mínima diferencia respecto de la concentración inicial.

El mayor peso promedio de cobre depositado sobre *Chondracanthus chamissoi*, 78,4 µg/g de alga, contrasta con 6.5 µg/g de *Spatoglossum schroederi* reportado por Amado et al. [24] y 8380 ppm de cobre y 6640 ppm de hierro, con Ulva Lactuca, que indica Reyes [25]. No se ha hallado mayor información sobre adsorción de metales sobre *Chondracanthus chamissoi*.

IV. CONCLUSIONES

Se concluye que el alga *Chondracanthus chamissoi* se puede emplear para biosorción de metales disueltos en un efluente de carácter contaminante y el tiempo de agitación de la solución experimental que permitió el contacto con la superficie del alga, fue la variable más significativa, notándose que las primeras horas presentan velocidades de primer orden de adsorción de metales sobre la superficie del alga cuyos pesos fueron la segunda variable en importancia. Además, el hierro presenta ligeramente mayor velocidad de adsorción que el cobre y el mercurio. Los niveles de concentración de metales disueltos en la solución experimental constituyeron la variable de menor significancia, por lo que podría convertirse en un parámetro del experimento, con una única concentración para todas las pruebas.

AGRADECIMIENTOS

Laboratorio de Procesamiento de Minerales. Escuela de Ingeniería Metalúrgica – Universidad Nacional de Trujillo.

REFERENCIAS

- [1] Bogush, A., Voronin, V., Tikhova, V., & Anoshin, G. (2016). Acid Rock Drainage Remediation and Element Removal Using a Peat-Humic Agent with Subsequent Thermal Treatment of the Metal-Organic Residue. *Mine Water and the Environment*, 536-546. doi:10.1007/s10230-015-0380-2
- [2] Favas, P., Sarkar, S., Rakshit, D., Venkatachalam, P., & Prasad, M. (2016). Chapter 17 - Acid Mine Drainages From Abandoned Mines: Hydrochemistry, Environmental Impact, Resource Recovery, and Prevention of Pollution. *Environmental Materials and Waste*, 413-462. doi:10.1016/B978-0-12-803837-6.00017-2
- [3] Akcali, I., & Kucuksezgin, F. (2011). A biomonitoring study: Heavy metals in macroalgae from eastern Aegean coastal areas. *Marine Pollution Bulletin*, 637-645. doi:10.1016/j.marpolbul.2010.12.021
- [4] Bogush, A. A., & Lazareva, E. V. (2011). Behavior of heavy metals in sulfide mine tailings and bottom sediment (Salair, Kemerovo region, Russia). *Environ Earth Sci*, 1293-1302. doi:10.1007/s12665-011-0947-6
- [5] Kumari, S., Udayabhanu, G., & Prasad, B. (2010). Studies on environmental impact of acid mine drainage generation and its treatment : an appraisal. *Indian Journal of Environmental Protection*, 953-967. Obtenido de <http://cimfr.csircentral.net/34/1/S31.pdf>
- [6] Carolin, C. F., Kumar, P. S., Saravanan, A., Joshiba, G. J., & Naushad, M. (2017). Efficient techniques for the removal of toxic heavy metals from aquatic environment: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2782-2799. doi:10.1016/j.jece.2017.05.029
- [7] Abinandan, S., Subashchandrabose, S. R., Venkateswarlu, K., & Megharaj, M. (2018). Microalgae-bacteria biofilms: a sustainable synergistic approach in remediation of acid mine drainage. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1131-1144. doi:10.1007/s00253-017-8693-7
- [8] Reichl, C., Schatz, M., & Zsak, G. (2014). Minerals Production International Organizing Committee for the World Mining Congresses. *World mining data*, 32(1), 1-261.
- [9] Johnston, D., & Potter, H. A. (2012). Abandoned mines, the water environment and a national programme of treatment in the UK. *Minewaters 2012: Understanding and addressing environmental impacts in the UK and beyond*.
- [10] Jones, D. R., Taylor, J., Pape, S., McCullough, C. D., Paul, B., Garvie, A., & Robertson, A. (2016). Preventing acid and metalliferous drainage-Leading Practice Sustainable Development Program for the Mining Industry. Commonwealth of Australia.

- [11] Alcolea, A., Vázquez, M., Caparrós, A., Ibarra, I., García, C., Linares, R., & Rodríguez, R. (2012). Heavy metal removal of intermittent acid mine drainage with an open limestone channel. *Minerals Engineering*, 86-98. doi:10.1016/j.mineng.2011.11.006
- [12] Genty, T., Bussière, B., Potvin, R., Benzaazoua, M., & Zagury, G. J. (2012). Dissolution of calcitic marble and dolomitic rock in high iron concentrated acid mine drainage: application to anoxic limestone drains. *Environmental Earth Sciences*, 2387–2401. doi:10.1007/s12665-011-1464-3
- [13] Taylor, J. P. (2005). A summary of passive and active treatment technologies for acid and metalliferous drainage (AMD). In *Proceedings of the 5th Australian workshop on acid drainage*, Vol. 29, pp. 1-49.
- [14] Dufresne, K., Neculita, C., Brisson, J., & Genty, T. (2015). Metal retention mechanisms in pilot-scale constructed wetlands receiving acid mine drainage. . In *Proceedings of the 10th ICARD (International Conference on Acid Rock Drainage)-IMWA (International Mine Water Association)*, 21-24.
- [15] Kim, I., Lee, M., & Wang, S. (2014). Heavy metal removal in groundwater originating from acid mine drainage using dead *Bacillus drentensis* sp. immobilized in polysulfone polymer. *Journal of Environmental Management*, 568-574. doi:10.1016/j.jenvman.2014.05.042
- [16] Cai, T., Liu, X., Zhang, J., Tie, B., Lei, M., Wei, X., . . . Du, H. (2021). Silicate-modified oiltea camellia shell-derived biochar: A novel and cost-effective sorbent for cadmium removal. *Journal of Cleaner Production*, 125390. doi:10.1016/j.jclepro.2020.125390
- [17] Loreto, C. D., Monge, O., Martin, A. R., Ochoa-Herrera, V., Sierra-Alvarez, R., & Almendariz, F. J. (2021). Effect of carbon source and metal toxicity for potential acid mine drainage (AMD) treatment with an anaerobic sludge using sulfate-reduction. *Water Science & Technology*, 2669-2677. doi:10.2166/wst.2021.163
- [18] Orandi, S., Lewis, D. M., & Moheimani, N. R. (2012). Biofilm establishment and heavy metal removal capacity of an indigenous mining algal-microbial consortium in a photo-rotating biological contactor. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 1321–1331. doi:10.1007/s10295-012-1142-9
- [19] Almomani, F., & Bhosale, R. R. (2021). Bio-sorption of toxic metals from industrial wastewater by algae strains *Spirulina platensis* and *Chlorella vulgaris*: Application of isotherm, kinetic models and process optimization. *Science of The Total Environment*, 142654. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.142654
- [20] Di, J., Jiang, Y., Wang, M., & Dong, Y. (2022). Document details - Preparation of biologically activated lignite immobilized SRB particles and their AMD treatment characteristics. *RSC Advances*, 3964. doi:10.1038/s41598-022-08029-y
- [21] Shirvanimoghaddam, K., Czech, B., Abdikheibari, S., Brodie, G., Kończak, M., Krzyszczyk, A., . . . Naebe, M. (2022). Microwave synthesis of biochar for environmental applications. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 105415. doi:10.1016/j.jaap.2021.105415
- [22] Montgomery, D. (2004). *Diseño y Análisis de Experimentos* (2° Edición ed.). México: Limusa S.A.
- [23] Bird, R., Steward, W., & Lightfoot, E. (2006). *Fenómenos de Transporte*. México: Limusa Wiley.
- [24] Amado, F. G., Andrade, L., Karez, C., Farina, M., & Pfeiffer, W. (1999). Brown algae species as biomonitors of Zn and Cd at Sepetiba Bay, Rio de Janeiro, Brazil. . *Marine Environmental Research*, 48 (1) : 213-224.
- [25] Reyes, I. (2002). Influencia del pH del efluente y diámetro de pelet de ulva lactuca sobre la biosorción de cationes arsénico, cobre, cinc, plomo, hierro, del efluente de la empresa Panamerican Silver. *OGPRODEIN, UNT, Trujillo, Perú*.