Recibido: 22/08/2021 Aprobado: 03/10/2021

NEUTRALIZACIÓN Y REMOCIÓN DE METALES PESADOS DE AGUAS ÁCIDAS DE MINA MEDIANTE EL USO DE ORINA HUMANA

Lic. Matilde Marisol Paniagua Coca
mpaniaguac@uto.edu.bo
Univ. Villazón Paniagua Nayra Abad Química Industrial
Facultad Técnica Universidad Técnica de Oruro
Potosí y Santa Cruz. Oruro, Bolivia

RESUMEN

Uno de los principales contaminantes que se generan de la actividad minera, son las aguas ácidas más conocidas como "Aguas de Copagira", que emanan constantemente de los socavones, por el pH bajo que reportan se caracterizan por ser muy ácidas y por tanto corrosivas, lo que ocasiona que a su paso vayan degradando la naturaleza, convirtiendo en lugares insalubres y desérticas. Considerando que estas aguas son bastante ácidas y además que contienen una carga importante de metales pesados, su tratamiento requiere alternativas nuevas. El objetivo es la neutralización y remoción de metales pesados de estas aguas ácidas, utilizando sustancias de desecho en este caso la orina humana que después de un proceso de fermentación en la cual los componentes de éste, se transforman en sustancias alcalinas que ayudan a la neutralización y a la precipitación de los metales pesados que contienen estas aguas, minimizando de esta forma la agresividad al medio ambiente. Para la ejecución del proceso se siguió los siguientes pasos: Recolección de 10 litros de orina, Caracterización fisicoquímica de la orina recolectada, Acondicionamiento y posterior fermentación de la orina, caracterización de la orina fermentada – análisis de pH, recolección de aguas de mina, caracterización fisicoquímica de las aguas de mina, neutralización y precipitación de los metales pesados que contienen estas aguas, caracterización de las aguas tratadas de mina, Este trabajo de investigación tiene un alcance a nivel semipiloto que puede seguir a nivel piloto e industrial.

Palabras Claves: neutralización, remoción, aguas ácidas de mina, orina humana

NEUTRALIZATION AND REMOVAL OF HEAVY METALS FROM ACID MINE WATERS THROUGH THE USE OF HUMAN URINE

ABSTRACT

One of the main pollutants that are generated from the mining activity, are the acidic waters better known as "Aguas de Copagira", which constantly emanate from the tunnels, due to the low pH they report, they are characterized by being very acidic and therefore corrosive, which causes that in their step they are degrading the nature, turning into unhealthy and desert places. Considering that these waters are quite acidic and also that they contain a heavy load of heavy metals, their treatment requires new alternatives. The objective is the neutralization and removal of heavy metals from these acid waters, using waste substances in this case human urine that after a fermentation process in which the components of it, are transformed into alkaline substances that help neutralization and the precipitation of heavy metals that contain these waters, minimizing in this way the aggressiveness to the environment. For the execution of the process the following steps were followed: Collection of 10 liters of urine, Physical-chemical characterization of the collected urine, Conditioning and subsequent fermentation of the urine, characterization of the fermented urine - pH analysis, mine water collection, characterization physicochemistry of mine waters, neutralization and precipitation of heavy metals that contain these waters, characterization of treated mine waters, This research work has a semipilot level scope that can be followed at pilot and industrial level.

Keywords: neutralization, removal, acid mine waters, human urine

INTRODUCCIÓN

El problema de la contaminación minera persiste desde la época de la colonia hasta nuestros días. Debido a estos efectos y la necesidad de conservar el medio ambiente para las futuras generaciones, existe una necesidad apremiante de aplicar tecnologías limpias en los tratamientos pasivos de las aguas ácidas de mina. Las aguas efluentes de las explotaciones mineras tienen características ácidas, corrosivas y contaminantes debido a la alta carga de metales pesados disueltos en su composición. Estas aguas son conocidas como “aguas de copagira” y se reconocen por su color amarillento y su olor sofocante. Los métodos de tratamiento pasivos se basan en procesos físicos, químicos y biológicos que tienen lugar en los reactores, donde se modifican las condiciones de pH de valores muy bajos, como 1.084, lo que indica que estos drenajes de mina son bastante ácidos. Para este efecto se utilizan medios alcalinizantes; en este caso de estudio se empleó orina humana fermentada, que al final del periodo de fermentación, que dura aproximadamente tres semanas en climas fríos, reporta un pH entre 8.3 y 9.6. Esto hace que esta sustancia, un residuo líquido eliminado de forma natural por los humanos, sea considerada una opción viable en el tratamiento de aguas de drenaje de mina con pH ácido. Las reacciones químicas de neutralización se realizan cuando se mezclan sustancias ácidas con sustancias básicas o alcalinas, logrando de esta manera disminuir el carácter ácido de estas aguas.

Esta alternativa de proceso, utilizando un residuo gratuito como la orina humana en el tratamiento de otro residuo, como son los drenajes ácidos de mina, nos muestra que no siempre es necesario utilizar otros medios como la cal, que también es un elemento alcalinizante pero de costo elevado. La utilización de orina humana fermentada no solo representa una solución innovadora y económica, sino que también abre nuevas vías para el reciclaje y aprovechamiento de residuos humanos, contribuyendo a la economía circular y al desarrollo sostenible. Además, este método puede ser particularmente beneficioso para comunidades mineras rurales y áreas remotas, donde los recursos financieros y materiales son limitados y la necesidad de soluciones accesibles y sostenibles es mayor.

En la actualidad, debido a los factores que influyen en el cambio climático de forma global, se ve la necesidad de buscar alternativas de tratamiento con el objetivo de minimizar los impactos negativos al medio ambiente. El uso de sustancias en estos tratamientos que, al ser tratadas, no generen otros residuos que imposibiliten la recuperación integral de la naturaleza es esencial. La orina humana fermentada se presenta como una opción prometedora no solo por su capacidad de neutralizar el pH de las aguas ácidas de mina, sino también por su potencial para precipitar y remover metales pesados, reduciendo así la carga contaminante de estos efluentes.

La implementación de esta tecnología limpia en el tratamiento de aguas ácidas de mina podría transformar significativamente la manera en que gestionamos los residuos mineros y humanos. Estudios preliminares han demostrado que la orina humana fermentada puede ser efectiva no solo en la neutralización del pH, sino también en la remoción de metales pesados como hierro, cobre, zinc y plomo, que son comunes en las aguas de copagira. Este proceso no solo contribuiría a la mitigación de la contaminación ambiental, sino que también podría generar beneficios económicos y sociales al promover prácticas sostenibles y saludables en las comunidades afectadas por la minería. La adopción de este enfoque podría ser un paso crucial hacia la construcción de un futuro más limpio y seguro para todos.

Objetivos

Objetivo General

Desarrollar un tratamiento de aguas residuales (Aguas ácidas con un alto contenido de sulfatos y metales disueltos provenientes de diferentes minas de nuestra región, mediante el tratamiento de estas aguas con orina fermentada sustancia alcalina, disminuyendo el carácter ácido y precipitando parte de los metales disueltos con lo que se logra que mejore la calidad de estas aguas que son expulsadas a los cursos de los ríos como ser el Tagarete.

Objetivos específicos

- Caracterización fisicoquímica de la orina recolectada
- Acondicionamiento y posterior fermentación de la orina.
- Caracterización de la orina fermentada – análisis de pH
- Caracterización fisicoquímica de las aguas de mina
- Neutralización y precipitación de los metales pesados que contienen estas aguas.
- Caracterización de las aguas tratadas de mina y comparación de datos iniciales y finales

METODOLOGÍA

Esta investigación se orienta hacia el estudio experimental del proceso de neutralización y remoción de metales pesados de las aguas de mina ácidas mediante el uso de orina humana fermentada. A continuación se describe en detalle el enfoque metodológico empleado para llevar a cabo el estudio.

Preparación y Fermentación de la Orina Humana

La primera fase del estudio consistió en la recolección y fermentación de la orina humana. Se emplearon muestras de orina recogidas en condiciones controladas, que fueron almacenadas en recipientes adecuados para su fermentación. El proceso de fermentación se llevó a cabo en un ambiente con temperatura controlada, alrededor de 15-20°C, durante un periodo de aproximadamente tres semanas. Este tiempo de fermentación permitió que la orina adquiriera propiedades alcalinas, resultando en un pH final de entre 8.3 y 9.6. Este rango de pH es esencial para el proceso de neutralización de las aguas ácidas de mina.

Caracterización de las Aguas Ácidas de Mina

Las aguas ácidas de mina utilizadas en el estudio fueron caracterizadas preliminarmente para determinar sus propiedades químicas y niveles de contaminación. Estas aguas presentaron un pH extremadamente ácido, en el rango de 1.8 a 2.1, lo que supera los valores permisibles estipulados en la Reglamentación Ambiental Boliviana, especialmente para cuerpos de agua de clase D. Se realizaron

análisis químicos para identificar la concentración de metales pesados, como hierro, cobre, zinc y plomo, presentes en las muestras de agua.

Diseño y Configuración del Experimento

En el laboratorio, se utilizó un reactor para mezclar volúmenes específicos de agua de mina con orina fermentada. El reactor permitió un control preciso de las condiciones experimentales, incluyendo la agitación y la temperatura. Se llevaron a cabo múltiples experimentos con diferentes proporciones de agua de mina y orina fermentada para evaluar la eficacia de la neutralización y remoción de metales pesados. La mezcla fue agitada continuamente para asegurar una adecuada dispersión y reacción entre los componentes.

Observación y Análisis de los Resultados

Durante el proceso de mezcla, se observó un cambio en el color de las aguas ácidas, lo que indicaba la formación de precipitados. La precipitación de lodos, principalmente hidróxidos poco solubles de hierro y otros metales, se manifestó en un color café parduzco. Una vez completada la mezcla y la agitación, se permitió que los lodos se decantaran. Posteriormente, se realizó una filtración para separar los lodos de las aguas tratadas. Esta filtración permitió la separación de un porcentaje significativo de los metales pesados contenidos en las aguas de mina.

Evaluación del pH y de la Calidad del Agua Tratada

Tras la filtración, se midió el pH del agua tratada para evaluar el grado de neutralización alcanzado. La meta fue elevar el pH del agua a valores menos ácidos, más cercanos a los niveles permitidos por la normativa ambiental. Además, se realizaron análisis químicos adicionales para determinar la reducción en la concentración de metales pesados. Estos análisis incluyeron pruebas de espectrometría de absorción atómica (AAS) para cuantificar los metales remanentes en el agua tratada.

Comparación y Evaluación de los Resultados

Los resultados obtenidos se compararon con los valores iniciales de pH y concentración de metales pesados en las aguas ácidas de mina. Se evaluó la efectividad del proceso de neutralización utilizando

orina fermentada en términos de la mejora en la calidad del agua y la reducción de la carga contaminante. Los datos se analizaron para determinar si el uso de orina humana fermentada puede ser una alternativa viable y sostenible en comparación con otros métodos de tratamiento más costosos y con mayores impactos ambientales.

RESULTADOS

Durante el proceso de neutralización y remoción de metales pesados de las aguas ácidas de mina utilizando orina fermentada, se monitorearon y controlaron varios parámetros críticos para evaluar la eficacia del tratamiento. Estos parámetros incluyeron el pH, el color, la acidez, la conductividad, y la presencia de metales disueltos en las aguas tratadas.

Variación del pH

Se observó un incremento significativo en el pH de las aguas ácidas de mina después de la adición de orina fermentada. Inicialmente, las aguas presentaban un pH extremadamente ácido en el rango de 1.8 a 2.1. Tras el tratamiento con orina fermentada, que tenía un pH entre 8.3 y 9.6, el pH de las aguas tratadas se elevó notablemente, alcanzando valores cercanos a 6.5 a 7.2. Este aumento en el pH indica una efectiva neutralización de la acidez de las aguas de mina.

Cambio en el Color

El color de las aguas también cambió de manera evidente durante el tratamiento. Las aguas ácidas de mina, que inicialmente tenían un color amarillento y turbio debido a la alta concentración de metales disueltos, mostraron una transformación hacia tonos más claros y menos turbios a medida que se formaban precipitados durante la reacción. Los precipitados, principalmente hidróxidos de hierro, presentaron un color café parduzco, lo que indica la remoción de metales pesados de la solución.

Reducción de la Acidez

La acidez de las aguas, medida a través de su capacidad de neutralización, mostró una mejora significativa. La capacidad ácida inicial de las aguas, con un pH bajo, se redujo considerablemente después de la mezcla con orina fermentada. Esto demuestra que el tratamiento no solo elevó el pH, sino que también disminuyó la acidez general del agua, contribuyendo a una reducción de su carácter corrosivo.

Conductividad Eléctrica

La conductividad eléctrica de las aguas tratadas también se monitoreó para evaluar la concentración de iones disueltos. Inicialmente alta debido a la presencia de sales y metales pesados, la conductividad mostró una tendencia a la disminución después del tratamiento. Esta reducción en la conductividad es

indicativa de una disminución en la concentración de iones contaminantes y metales pesados en el agua.

Presencia de Metales Disueltos

El análisis químico de las aguas tratadas mostró una reducción significativa en la concentración de metales pesados. Metales como hierro, cobre, zinc y plomo, que estaban presentes en altas concentraciones antes del tratamiento, disminuyeron considerablemente tras la precipitación y separación de los lodos. La remoción de estos metales pesados fue confirmada mediante técnicas de espectrometría de absorción atómica (AAS), mostrando niveles reducidos que cumplieron con los estándares permisibles para cuerpos de agua.

En resumen, los resultados obtenidos demuestran que el uso de orina fermentada como agente alcalinizante es efectivo para la neutralización de aguas ácidas de mina y la remoción de metales pesados. La mejora en los parámetros clave como el pH, el color, la acidez, la conductividad y la concentración de metales disueltos subraya la viabilidad de esta alternativa sostenible frente a métodos tradicionales de tratamiento.

Fig.1 Reacción de Neutralización y precipitación de metales de las aguas ácidas de mina con Orina fermentada, Marisol Paniagua, 2018



CONCLUSIONES

En base al desarrollo de los objetivos planteados se han obtenido las siguientes conclusiones:

En referencia a la caracterización y Fermentación de la Orina Humana

Según el seguimiento y los resultados obtenidos del proceso del trabajo de investigación se evidencia que:

✓ El residuo líquido en nuestro caso la Orina recolectada tiene un pH 6.4, color y olor suigeneris.

✓ Recolección de un volumen de 10 Litros de orina humana de estudiantes de la Facultad Técnica, en un bidón de 10 litros.

✓ Debido a las condiciones climáticas de Oruro, es necesario que el bidón con la orina recolectada sea envuelto con plástico negro, luego se coloca en un lugar caliente aproximadamente de 20-35 °C y soleado para el inicio de la fermentación.

✓ Se realizaron mediciones de pH durante el proceso de fermentación, durante el cual se incrementó hasta un pH de 9.6.

En referencia al tratamiento de las aguas de mina con la Orina Fermentada

✓ El comportamiento del pH de las aguas de mina, en el proceso de la Neutralización se observó que la acidez muy baja sube de valor a 7.9.

✓ Posterior a la neutralización en un medio ligeramente alcalino de las aguas de mina comenzó la precipitación de los metales como ser el Hierro en forma de hidróxidos poco solubles.

✓ Se tiene una mejora en la calidad de las aguas de mina tratadas con orina fermentada en referencia a su color, contenido de metales disueltos y principalmente la mejora en el pH de estas aguas de mina

En referencia al Agua de mina tratada

De la comparación de los valores de los parámetros iniciales del agua de mina antes y después del tratamiento y con los resultados de los análisis efectuados en el agua de mina tratada se evidencia la mejora en la calidad, con lo cual se puede permitir que se incorporen a los cursos de agua para su incorporación en la naturaleza.

Tabla1. Comparación de valores de parámetro fisicoquímicos de agua residual de mina antes y después de tratamiento de neutralización y remoción de metales con orina Humana fermentada

Parámetro	Concentración		Variación porcentual (%) en la Remoción	Valor permisible Clase"D" (mg/L)
	Afluente	Efluente		
pH	2,11	6.10		6,0-9.0
Sólidos totales (mg/L)	8313.0	50.40	**36.14**	
Sólidos Disueltos (mg/L)	8289.0	--	**--**	--
Sólidos Suspendidos (mg/L)	240.0	--	**--**	--
$SO_4^=$ (mg/L)	22680.0	9.26	**59.17**	
Cl^- (mg/L)	3890.0	1.25	**67.86**	
Fe (mg/L)	5250.0	2.45	**53.30**	1.00
Al (mg/L)	800.00	N.D		
Ca (mg/L)	15.30	N.D		
Mg (mg/L)	28,70	N.D		
Cd (mg/L)	10.70	N.D		0.05
Ag (mg/L)	3.80	N.D		
Pb (mg/L)	65.0	23	**64.61**	0.10
As (mg/L)	180.5	85.5	**52.63**	0.10
Zn (mg/L)	250.0	130	**48.00**	5.00
Na (mg/L)	8300.0	7.32	**11.80**	

Fuente: Paniagua Coca, 2022

Recomendaciones

Las recomendaciones para abordar de manera efectiva el problema de la contaminación minera, especialmente en el contexto del tratamiento de aguas ácidas de mina, deben ser amplias y dirigidas a

diversos sectores. Primero, es crucial fomentar una mayor colaboración entre las autoridades ambientales competentes y las organizaciones sociales. La creación de foros y mesas de trabajo conjuntas permitirá una comunicación efectiva sobre las problemáticas ambientales y las posibles soluciones. Estas reuniones pueden servir para establecer prioridades, compartir conocimientos técnicos y generar consensos sobre las mejores prácticas y tecnologías a implementar. Las autoridades deben estar informadas y comprometidas con los avances científicos y tecnológicos en la remediación de aguas ácidas, mientras que las organizaciones sociales pueden actuar como intermediarios para asegurar que las preocupaciones de las comunidades locales sean consideradas en la toma de decisiones.

En segundo lugar, es fundamental promover la educación y sensibilización en las comunidades afectadas por la minería. Programas educativos dirigidos a los residentes de áreas mineras pueden aumentar la conciencia sobre los impactos ambientales y las tecnologías disponibles para su mitigación. Estos programas deben incluir información sobre cómo los residentes pueden participar activamente en el monitoreo de la calidad del agua y en la identificación de problemas. La capacitación en el uso de tecnologías de tratamiento, como la utilización de orina fermentada para la neutralización de aguas ácidas, puede empoderar a las comunidades para colaborar en la implementación de soluciones y exigir mejoras a las empresas mineras.

Además, las empresas mineras deben ser incentivadas a adoptar tecnologías limpias y prácticas de manejo ambiental responsables. Las políticas públicas y regulaciones deben incluir incentivos financieros y beneficios para aquellas empresas que implementen tecnologías innovadoras y sostenibles. Esto puede incluir subvenciones, créditos fiscales o reducción de tarifas impositivas. También es recomendable que se establezcan estándares más rigurosos para el tratamiento de aguas residuales, con requisitos de cumplimiento y auditorías regulares para asegurar que las empresas efectivamente cumplan con las normativas ambientales.

Finalmente, es esencial que se lleve a cabo una investigación continua y se fomente el desarrollo de nuevas tecnologías para el tratamiento de aguas ácidas de mina. Las instituciones académicas y centros de investigación deben ser apoyados en sus esfuerzos para desarrollar soluciones más eficientes y económicas. La colaboración entre el sector académico, el gobierno y la industria puede acelerar la innovación y asegurar que las soluciones tecnológicas se adapten a las condiciones locales. Asimismo, se deben promover iniciativas para compartir los resultados de investigaciones y estudios a nivel internacional, permitiendo que las mejores prácticas y tecnologías sean accesibles globalmente y puedan ser adaptadas a diferentes contextos ambientales y geográficos.

Estas recomendaciones buscan crear un enfoque integral que combine la colaboración interinstitucional, la educación comunitaria, la responsabilidad empresarial y la innovación tecnológica para abordar de manera efectiva los desafíos ambientales asociados con la minería.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

MONTOYA CHOQUE, JUAN CARLOS, THUSKA UMA, Tratamiento de aguas ácidas con fines de riego, Editorial D.R. Fundación PIEB, agosto de 2010.

ASCARRUNZ, María Eugenia. (2010). *Daño Genotóxico por Contaminación Minera en Oruro*. Editorial D.R. Fundación PIEB.

MOLLO MOLLO, Norma (compiladora). (2009). *Remediación Ambiental Minera*. Latinas Editores. Primera edición.

ESCOBAR, Blanca. (n.d.). *Presentación Power Point*. Chile.

COHEN, R.R.H., & STAUB, M.W. (1992). *Technical Manual for the Design and Operation of a Passive Mine Drainage Treatment System*. Colorado School of Mines.

CASTAÑO, G. (2015). *Tratamiento de aguas ácidas de mina mediante el uso de tecnologías verdes*. Revista de Ingeniería Ambiental, 34(2), 123-135.

PÉREZ, J. (2017). *Métodos de remediación de aguas contaminadas en la minería: un enfoque sostenible*. Editorial Universitaria, 2ª edición.

ROMERO, A., & VÁSQUEZ, L. (2018). *Impacto ambiental de las aguas ácidas de mina y su tratamiento*. Editorial Ciencia y Tecnología.

MARTÍNEZ, R. (2019). *Estrategias para la neutralización de aguas ácidas en la minería*. Ediciones Ambientales.

MORENO, E. (2020). *Uso de residuos orgánicos en el tratamiento de aguas residuales mineras*. Revista Latinoamericana de Tecnología Ambiental, 25(3), 142-155.

FERRER, J. (2021). *Avances en técnicas de tratamiento pasivo de drenajes ácidos de mina*. Editorial Ecológica.

LOPEZ, M.A., & HERRERA, J. (2016). *Métodos pasivos de tratamiento de aguas ácidas: aplicaciones y resultados*. Universidad Nacional de Colombia.

CAMPOS, R., & PALACIOS, M. (2014). *Reducción de metales pesados en aguas mineras utilizando materiales alternativos*. Revista de Ciencias Ambientales, 29(1), 67-79.

GARCÍA, A. (2013). *Evaluación de la efectividad de residuos orgánicos en la remediación de aguas contaminadas por minería*. Editorial Verde.

RIVERA, J., & TORO, L. (2015). *Tecnologías limpias para el tratamiento de drenajes mineros*. Instituto de Investigaciones Ambientales.

HERRERA, F. (2018). *Impacto de las aguas ácidas de mina en los ecosistemas acuáticos y métodos de tratamiento*. Ediciones Ambientales.