

Aplicación de la ceniza fina de carbón para separar los cationes tóxicos en las aguas del Río Matola, Provincia Maputo

Applying Fine Coal Ash for Removing Toxic Cations in Waters of Matola River, Maputo Province

Esnaider Rodríguez Suárez rodriguezsuarez2013@gmail.com ⁽¹⁾

Stefânia Paulo Chambal stefaniachambal96@gmail.com ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Universidad Wutivi-UniTiva Boane, Maputo, Mozambique

Resumen: Se propone aplicar cenizas finas de relaves de carbón para eliminar cationes tóxicos en aguas del río Matola, Provincia de Maputo, provenientes de actividades industriales, con el fin de valorizar el material desechado tras su procesamiento y minimizar los impactos ambientales. Para lograr el objetivo, se sintetizaron las cenizas de los relaves de carbón fino mediante el método de calcinación, luego se realizó la caracterización fisicoquímica y química de las cenizas y la caracterización fisicoquímica del efluente antes y después de la interacción con las cenizas mediante espectrometría de fluorescencia de rayos X (XRF) y espectroscopia acoplada inductivamente (ICP-S). El efluente interactuó con las cenizas a través del proceso de adsorción, utilizando 0,5 g, 1 g y 2 g de ceniza por cada 50 ml de efluente respectivamente. Las cenizas de carbón actúan como un buen agente en la remediación de cationes tóxicos como Zr, Cr, As, Th, Mn, Pb y Zn presentes en el efluente, lo que valida la hipótesis H1, que establece que es posible eliminar cationes metálicos tóxicos presentes en aguas contaminadas mediante el uso de cenizas finas de carbón como adsorbente. La dosis eficiente para el tratamiento y la eliminación de los cationes tóxicos presentes en el efluente de la empresa Mozal es de 2 g por 50 ml de efluente, ya que el mismo tiene un pH de 7,38, una conductividad de 21,64 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y un TDS de 10,23 mg/l.

Palabras clave: toxicidad por metales, contaminación fluvial, metales pesados

Abstract: This paper is a proposal to apply fine ashes of coal tailings to eliminate toxic cations in waters in Matola River, Maputo Province, coming from industrial activities in order to enhance the material discarded after processing and minimizing environmental impacts. To fulfill the objective, ashes from fine coal tailings were synthesized by calcination method. Then physicochemical and chemical characterizations of the ashes

were performed, as well as physicochemical characterization of the effluent before and after the interaction with the ashes by X-ray fluorescence spectrometry (XRF) and inductively coupled spectroscopy (ICP-S). After characterizing the effluent interacted with the ashes through the adsorption process, using 0.5 g, 1 g, and 2 g of ash per 50 ml of effluent, respectively. Coal ashes act as good agent in removing toxic cations such as Zr, Cr, As, Th, Mn, Pb and Zn. present in the effluent, which validates hypothesis H1 which states that it is possible to remove toxic metal cations present in polluted waters by using fine coal ashes as absorbent. The efficient dose for treating and removing toxic cations present in the effluent from Mozal Company, should be of 2 g per 50 ml of effluent, since the effluent has a pH of 7.38, conductivity of 31.65 $\mu\text{S}/\text{cm}$ and TDS of 10.23 mg/l.

Key words: heavy metal, metal toxicity, river pollution

Introducción

La minería del carbón juega un papel histórico en el desarrollo sostenible de un país, ya que contribuye desde el punto de vista económico a la matriz energética mundial (Borba 2001; Fuentes López, Ferrucho Parra y Martínez González, 2021).

De acuerdo con José & Sampaio (2011), Mozambique tiene un amplio rango de geo-recursos en explotación (Aurre & Jaén, 2015; Macamo, 2022; Wu & Dzedzemoon, 2024), como el carbón en la Provincia de Tete, especialmente en el distrito de Moatize, con uno de los yacimientos de carbón más grande del país, con reservas estimadas de más de 2.5 billones de toneladas (Marove *et al.*, 2020; Marove *et al.*, 2022; Campos, Morais y Mafavisse, 2022). Aunque el carbón mineral es un recurso energético y metalúrgico importante en la sociedad actual, su exploración, procesamiento y uso son actividades potencialmente contaminantes, que a menudo liberan algunos metales pesados que degradan el medio ambiente físico (Macie, 2015; Buitrago & Rodríguez-Aparicio, 2021; Chávez-García, 2022; González-Jiménez *et al.*, 2023).

Durante el procesamiento del carbón, parte del material se descarta y se acumula en grandes áreas, lo que se conoce como relaves, que van desde relaves ROM1 (Run Of Mine) hasta relaves ultrafinos dependiendo del tamaño del grano (Epósito, 2000). Estos materiales retornan a los pozos de minado, provocando efectos negativos en el entorno, tales como drenaje ácido de la mina, que de acuerdo con Mello *et al.* (2012), es un fenómeno que se inicia cuando se extraen las rocas que contienen minerales sulfurosos

del interior de la tierra mediante operaciones se minería y cuando se descargan sobre la superficie de la tierra, se oxidan mediante la reacción con agua y el oxígeno atmosférico.

Una alternativa para estos relaves es su aplicación en el tratamiento de efluentes líquidos como sólidos absorbentes para la eliminación de contaminantes acuosos. Entre los principales contaminantes acuosos se encuentran los cationes tóxicos, debido a sus efectos cancerígenos y mutagénicos, altamente dañinos para los organismos vivos.

El objetivo de este trabajo es utilizar la ceniza fina de carbón mineral, para la separación de los cationes tóxicos de las aguas contaminadas del río Matola, municipio de Matola, Provincia de Maputo.

Ubicación geográfica

El área de estudio (empresa Mozal) está ubicada en el distrito de Boane, al sureste de la provincia de Maputo, limita al norte con el distrito de Moamba, al sur y al este con el distrito de Namaacha, y al oeste con la ciudad de Matola y el distrito de Matutuine, Cuenta con una superficie de 815 km² (MAE, 2005).

Geología regional

Geológicamente, la región forma parte de la cuenca sedimentaria de Mozambique, al sur de Save, con una superficie de 170.000 km². El límite de la cuenca, al este, es el Océano Índico y al oeste, las rocas basálticas y riolíticas del Karoo, que forman la base de los depósitos sedimentarios del Cretácico, de origen marino. Se conocen formaciones de origen marino y continental, cuya deposición estuvo controlada por transgresiones y regresiones marinas en el Terciario, y en el Cuaternario, sedimentos eluviales y aluviales.

Hidrografía

Los canales hidráulicos en el distrito de Boane pertenecen a Umbeluzi, Tembe y a las cuencas del río Matola. El distrito es cruzado por los ríos Movene y Nwlate (tributarios de Umbeluzi). El más importante de estos es el río Umbeluzi, que asciende en Eswathini y después de 70 km fluye hacia el Estuario Espíritu Santo, donde también tienen sus bocas los ríos Matola y Tembe (MAE, 2005).

El río Umbeluzi es la fuente de agua potable para las ciudades de Maputo y Matola, ambas con una población creciente. No obstante, el suministro de agua escasea, lo que

hizo necesario construir el Pequeño Embalse de Libombos, como parte de una estrategia para el uso y aprovechamiento de los recursos naturales (MAE, 2005).

Materiales y método

El tipo de método científico que inicia con un problema o un intervalo en el conocimiento científico requiere la formulación de hipótesis y de un proceso de inferencia deductiva que permite comprobar los pronósticos, de la ocurrencia del fenómeno cubierto por la hipótesis propuesta (Prodanov & Freitas, 2013).

Se trata de aplicar el conocimiento científico para resolver problemas medioambientales generados por la acumulación de desechos sólidos industriales y por la contaminación del agua por los metales pesados, a partir de los efluentes industriales. Los resultados de esta investigación se pueden aplicar para resolver los problemas que ocurren en la realidad, en diferentes partes del país y en el mundo, de acuerdo con Gil (2019), quien expresa que la investigación aplicada incluye los estudios diseñados para resolver los problemas identificados dentro del alcance de la sociedad. La investigación aplicada, contribuye a la adaptación del conocimiento científico y sugiere los temas a investigar.

Se aplicaron enfoques cualitativos y cuantitativos combinados, clasificados de acuerdo a Nascimento *et al.*, (2015), quien lo define como el enfoque o el método que utiliza las medidas estandarizadas y sistemáticas y además las combina con la interpretación de los fenómenos observados. Esta investigación es un estudio exploratorio encaminado a aproximarse al problema mediante el uso de la técnica de observación para recopilar las muestras con ayuda de la investigación explicativa.

De acuerdo con Gil (2008), la investigación explicativa permite lograr mayor comprensión del problema. La misma puede incluir un estudio bibliográfico y la realización de entrevistas con las personas de experiencia en el problema que está siendo investigado. La investigación explicativa tiene el objetivo de identificar los factores que determinan o contribuyen a la ocurrencia del fenómeno, es el tipo de investigación que profundiza en el conocimiento de la realidad.

Procedimientos técnicos

Investigación bibliográfica

La investigación bibliográfica se basa en los materiales, que ya han sido preparados, especialmente libros y artículos científicos. Su ventaja principal consiste en la posibilidad de estudiar una amplia gama de fenómenos.

Esta fase está compuesta por la investigación bibliográfica en Internet, realizada sobre el estudio de la evaluación del potencial de las colas de carbón, y la consulta de libros electrónicos, artículos científicos, tesis y proyectos científicos, relacionados con el proceso del carbón, el manejo de residuales sólidos, los iones tóxicos, los métodos y procedimientos para mejorar el agua contaminada e información del área de estudio.

Investigación documental

En esta fase de la investigación se utiliza la información adquirida en Internet y la información de la Biblioteca Universitaria de Wutivi para consultar los trabajos relacionados con el manejo de residuales sólidos. De acuerdo con Gil (2008), la investigación documental es similar a la investigación bibliográfica. La diferencia consiste en las fuentes, debido a que se utiliza la biblioteca universitaria, para los materiales que aún no han recibido un tratamiento analítico, o que aún pudieran ser reelaborados de acuerdo con los objetivos de la investigación.

Se realizaron las actividades experimentales a partir del proceso de toma de muestras del RFC suministrado por el Departamento de Química de la Universidad Eduardo Mondlane, y las muestras de los efluentes de las operaciones del proceso de Mozal, en la provincia de Maputo, las pruebas de laboratorio para comprobar las hipótesis y de este modo implementar la tesis de Gil (2008) quien expresa que la investigación se deriva de un objeto de estudio, adonde se seleccionan las variables que pudieran influir sobre las mismas y se definen los procedimientos de control y observación de los efectos que la variable produce sobre el objeto.

Métodos

El departamento de Química suministró las colas finas de carbón de la Mina Benga-ICVL.

Se tomó la muestra del efluente industrial en el punto de descarga del Río Matola en la provincia de Maputo. La Figura 6 muestra el proceso de toma de muestras de efluentes y en la Tabla 1 se describe el punto para la toma de las muestras:

Tabla 1. Punto para la toma de muestra de los efluentes

Coordenadas geográficas			
	Latitudes	Longitud	Elevación
Punto 1	25°54'40.51"S	32°25'10.83"E	6,096 m
Punto 2	25°54'44.51"S	32°25'10.91"E	8,78 m

Trabajo de laboratorio

Esta fase fue realizada durante de 45 días en el Laboratorio del Departamento de Química de la Universidad Eduardo Mondlane (UEM), mediante los procedimientos de solicitud, autorización y la aceptación para realizar las pruebas de laboratorio específicamente:

- La obtención de la ceniza fina de carbón, mediante el método de calcinación.
- La caracterización física y la caracterización química de las colas finas de carbón.
- La composición física y la composición química de la muestra de efluentes de operaciones industriales.
- Realización de los procesos de adsorción
- Caracterización del efluente después de la interacción de la ceniza con el efluente.
- Consulta con los especialistas medio ambientalistas del departamento de química de la facultad de ciencias en la Universidad Eduardo Mondlane.

Procedimientos de laboratorio

Los procedimientos de laboratorio consistieron en la preparación de la muestra fina de carbón y el efluente líquido, así como sus respectivas caracterizaciones físico-químicas mediante la aplicación de los métodos adecuados para cada análisis, para la posterior producción de la muestra fina de carbón y finalmente la aplicación del método de adsorción, para eliminar los cationes tóxicos del agua.

Preparación de la muestra de ceniza fina de carbón

Se preparó la muestra de RFC, primeramente, se trituró la misma en un mortero y fue procesada para reducir su granulometría hasta obtener una granulometría más fina (polvo), y luego se realizó el pesaje de 200 g de la muestra de RFC en una balanza.

Se realizó el proceso de calcinación para obtener la ceniza de la muestra de RFC. Se utilizaron 6 crisoles de porcelana con capacidad de 10 ml a 30 ml, adonde se añadió un total de 200 g de la muestra de RFC previamente pesada en la balanza. Se colocaron en el horno de mufla, con una capacidad de 30-300 °C, a una temperatura de 850 °C, durante un periodo de tiempo de 10 días, con el horno de mufla durante 6 horas por día (Figura 1).



Figura 1. a) Demostración del pesaje de la muestra utilizando la balanza técnica. b) Calcinación de carbón vegetal en el horno de mufla utilizando crisoles.

Preparación de la muestra de efluente líquido

Primeramente, se preparó el efluente utilizando papel de filtro. Se filtró una cantidad de 150 g, dos veces para retener los residuales contenidos en el efluente que pudiera obstruir la máquina, en caso de que el efluente no fuera al proceso de filtración b1, seguido de la adición de los reactivos, que se vierten en el frasco de 50 ml para su mejor preservación.

Caracterización de la muestra

Para la caracterización físico-química de la ceniza de RFC, y las muestras de efluentes, se utilizaron los métodos y equipos adecuados, cada uno con su función específica.

Caracterización física

Se determinaron las características físicas de las muestras de la ceniza fina de colas de carbón y las trazas de las porciones utilizadas, mediante la observación visual y análisis de las características físicas del efluente líquido, antes de la interacción con la ceniza y el efluente de líquido, después de la interacción con la ceniza, mediante el uso de los materiales y los equipos de laboratorio del Departamento de Química en UEM, donde se analizó el p.H utilizando el medidor de pH, así como la conductividad.

Caracterización química

Se determinó la caracterización química de la ceniza de carbón utilizando el equipo XRF, adonde el procedimiento consistió en colocar una muestra de ceniza de carbón en el puerto para muestras. Luego se esperó un intervalo de tiempo de 15 minutos, según lo determinado a partir de las instrucciones del equipo. Después de este intervalo de tiempo, se introdujeron e interpretaron los datos, utilizando una tabla y un gráfico y luego se realizó la caracterización química del efluente e influente mediante la aplicación del método ICP-S.

Análisis de los resultados

Caracterización física

Se analizaron los resultados de los parámetros evaluados de las muestras de ceniza mediante la observación visual, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados de los parámetros físicos analizados de la ceniza fina de residuales de carbón

Parámetros físicos analizados	Resultados
Color del tramo	Color marrón claro
Color de los tramos utilizados	Color marrón claro

Los resultados de la Tabla 2 demuestran que la ceniza fina obtenida del residual de carbón y las trazas de ceniza utilizadas no mostraron ningún cambio en su color inicial.

Caracterización química

En la Tabla No. 3 se muestran los resultados de las muestras analizadas de la ceniza de carbón, mediante el uso de la técnica de fluorescencia de rayos x.

Tabla 3. Se muestran los resultados del análisis químico de la ceniza de carbón mediante XRF

Si	Al	Fe	K	Ca	Ti	S	P	V	Zr	Sr
46.04	22.52	14.86	4.57	4.48	3.74	1.61	1.15	0.20	0.18	0.17
Cu	Cr	Zn	Rb	Ir	Mn	As	Y	Pb	Nb	Th
0.08	0.06	0.05	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.023	0.018	0.007

Los resultados de la caracterización geoquímica de la ceniza fina del residual de carbón mediante el método XRF, demuestran que la ceniza contiene los mayores elementos de K (4.57 %); Ca (4.48 %); Ti (3.74 %); elementos menores como el S (1.61 %); P (1.15 %); Cu (0.08 %); Cr (0.06 %); Zn (0.05%) y como elementos de traza: V (0.20 %); Zr (0.18 %); Sr (0.17 %); Rb (0.03); Ir (0.03); Mn (0.03); As (0.03); Y (0.02); Pb (0.023); Nb (0.018) y Th (0.007).

Caracterización física del efluente

Se muestran los resultados obtenidos de la caracterización químico-física del efluente industrial (antes de la interacción con la ceniza del residual de carbón).

La Tabla 4 muestra los resultados del análisis de las muestras de efluentes, aplicando las muestras de efluentes mediante la aplicación del método ICP-S (Espectrometría de plasma acoplado inductivamente).

Tabla 4. Resultados del análisis físico-químico del efluente

Parámetros físicos-químicos evaluados	Concentración (mg/L)	Ma Límite máximo permitido por la legislación nacional
pH	7,29	6.5-8.5
Conductividad	22,01	5-20 ms/cm
Sólidos totales disueltos	11,11	1000 mg/L
Contenido de aluminio	1.38	0.3 mg/L
Contenido de manganeso	3.8	0.1 mg/L
Contenido de calcio	79.82	50 mg/L
Contenido de magnesio	73.22	50 mg/L
Contenido de cromo	0.39	0.05 mg/L
Contenido de níquel	0.18	0.02 mg/L
Contenido de sodio	325.33	200 mg/L
Contenido de Cinc	5.08	3.0 mg/L
Contenido de arsénico	0.072	0.01 mg/L
Contenido de cadmio	0.12	0.03 mg/L
Contenido de plomo	0.23	0.1 mg/L

Los resultados demuestran un elevado contenido de metales pesados, presentes en las muestras analizadas de efluentes. Entre los principales cationes tóxicos cuantificados, se destaca lo siguiente:

- El aluminio con 3.87 mg/L, Hierro con 1.38 mg/L, Manganeseo con 3.3 mg/L, Calcio, con 79.82 mg/L, Cromo con 0.39 mg/L, Sodio con 325.33 mg/L y el Manganeseo con 73.22 mg/L.

Caracterización físico-química del efluente posterior a la interacción con la ceniza de carbón

Mushtaq *et al.* (2019) estudiaron las posibles aplicaciones de la ceniza de carbón en el tratamiento de aguas residuales, donde se evidenciaron tentativas para la conversión de la ceniza volante de carbón, en busca de su utilización sostenible. El mejoramiento de aguas residuales con el uso de la ceniza de carbón es uno de los intentos para resolver los temas, tanto el manejo de los residuales como el de la calidad del agua. Características como la morfología, área de superficie, porosidad, así como la composición química (sílice, alúmina, óxido de hierro, titanio), contribuyen a que la ceniza volante de carbón sea un material adecuado y de posible aplicación para el tratamiento de las aguas residuales. En algunos reportes se resume la utilización de la ceniza volante de carbón para el tratamiento de aguas residuales, pero solamente se analiza la adsorción.

Además de la adsorción, el objetivo principal de la investigación, es resaltar las posibilidades de utilizar la ceniza volante de carbón para el tratamiento de las aguas residuales, mediante la aplicación de diferentes tecnologías que amplían el alcance en los procesos de filtración, como el proceso Fenton, fotocátalisis y coagulación. Se revisa también el posible uso de la ceniza volante de carbón como un adsorbente, filtro de membrana, fenton, fotocátalisis y como parte integral de éstas.

Se realizó la caracterización físico-química del efluente (después de la interacción con la ceniza), teniendo en cuenta el potencial del hidrógeno, la conductividad eléctrica, los sólidos disueltos y los niveles de metales pesados tóxicos (Tabla 5 y Figura 2).

Tabla 5. Resultados de los parámetros físicos químicos analizados, después de la interacción con la ceniza

Parámetros físicos-químicos	Afluente		
	AM-1 (0.5g de ceniza)	M-21 (1 g de ceniza)	AM-3 (2 g de ceniza)
pH	7,58	7,55	7,38
Conductividad (us/cm)	22,14 ms/cm	20,77ms/cm	21,64 ms/cm
TDS (mg/l)	10,74 mg/l	10,80 mg/l	10,23 mg/l
Aluminio	1.03	0.72	0.14
Hierro	0.87	0.41	0.11
Manganeseo	1.14	0.91	0.09
Calcio	48.50	33	31.08

Parámetros físicos-químicos	Afluente		
	AM-1 (0.5g de ceniza)	M-21 (1 g de ceniza)	AM-3 (2 g de ceniza)
Magnesio	63.45	61.08	48.2
Cromo	0.12	0.08	0.031
Níquel	0.14	0.09	0.009
Sodio	188.95	132	112
Cinc	3.71	3.04	2.54
Arsenio	0.040	0.023	0.08
Cadmio	0.09	0.061	0.024
Plomo	0.19	0.13	0.08

En la Figura 2 se muestra una comparación de los porcentajes de la ceniza utilizada para la interacción con las muestras de efluente. Los resultados confirman el potencial de la ceniza fina de los residuales de carbón, como un absorbente adecuado de los cationes tóxicos y su efecto correctivo.

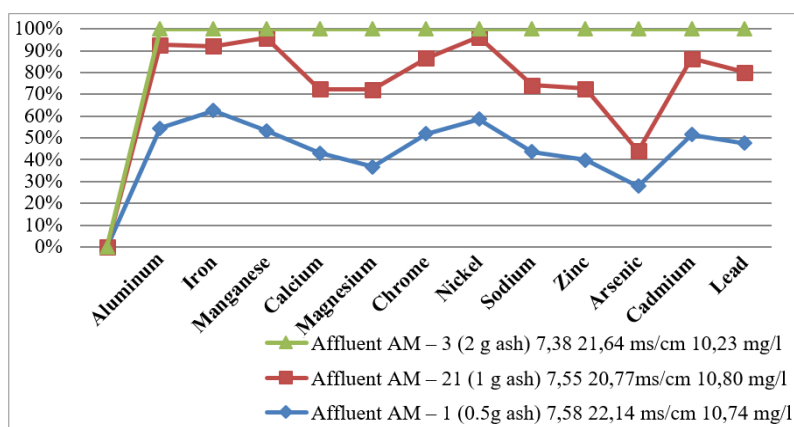


Figura 2. Resultados del análisis de la interacción de la ceniza de carbón con el efluente.

Como se muestra en el gráfico de la figura 2, la dosificación de 2 g de ceniza de carbón mostró los menores resultados en la eficiencia de la eliminación de los cationes tóxicos presentes en el efluente. Los cationes tales como el de aluminio, que tenía un contenido de 3.87 mg/L en el efluente, después de interactuar con la ceniza de carbón, el contenido descendió hasta 0.14 mg/L, el hierro, desde 1 38 mg/L hasta 0.11 mg/L, el manganeso desde 3.8 mg/L hasta 0.9 mg/L, el calcio desde 79.82 hasta 31 mg/L, el cromo desde 0.39 mg/L hasta 0.031 mg/L.

Lekgoba, Ntuli y Falayi (2021), estudiaron las propiedades de adsorción de la ceniza volante de carbón en la separación del níquel y el cobre de las aguas residuales, aplicando los estudios realizados sobre la columna de lecho fijo y discontinuo. Se comprobaron varios parámetros de proceso, tales como el p.H de la solución, la carga de sólidos, el tiempo de residencia, la temperatura, la altura del lecho y el régimen de

flujo, para determinar la efectividad de la ceniza volante. La investigación demostró que la ceniza volante es un absorbente efectivo en el proceso de separación del níquel y el cobre de las mezclas.

La muestra colectada en el campo (efluente) mostró un p.H de 7.29, valor que es relativamente bajo cuando se compara con las muestras de efluentes. Después de mezclarse con 0.5 g, 1 g y 2g de ceniza, (denominados como AM1, AM2 y AM3 respectivamente), el efluente comenzó a mostrar un elevado valor de p.H. Esto demuestra que la ceniza de las colas tiene la capacidad de incrementar el contenido básico de agua contaminada. Además, los resultados demuestran que, a mayor cantidad de ceniza, habrá mayor cantidad de efluente básico.

Uno de los parámetros que se puede utilizar como referencia, incluso para el conocimiento elemental sobre la calidad de los cuerpos de agua, es la conductividad eléctrica (EC). La conductividad eléctrica del agua representa un parámetro físico utilizado para obtener las características de un medio líquido dado. En términos de agua superficial, es relativamente fácil y rápido procesar para caracterizar el medio. En general esto refleja la capacidad del agua para conducir la corriente eléctrica. Esta propiedad puede ser un parámetro relativo para comparar la cantidad de sales presentes. En este proyecto de 4 muestras, la de efluente muestra un valor relativamente elevado, pero después del mezclado con la ceniza, se evidencia una reducción en el valor de conductividad. Se observa que, a mayor cantidad de ceniza en la mezcla, menor conductividad en el efluente. De este modo, se demuestra una alta eficiencia en el control de la conductividad eléctrica, relacionado con las sales disueltas.

Los sólidos totales disueltos (TDS) están relacionados directamente con la conductividad eléctrica. En los resultados, después del mezclado del efluente con la ceniza, la tendencia de los sólidos totales es a decrecer, principalmente con el incremento de la cantidad de ceniza. Estos resultados demuestran la efectividad de la ceniza fina de carbón residual, para reducir el contenido de sólidos disueltos totales en el proceso, minimizando la contaminación de las vías hídricas.

Conclusiones:

- Los resultados de la caracterización química y mineralógica, demuestran que la caracterización física (macroscópica) del carbón, tiene una coloración ligeramente cobriza y una línea del mismo color.

- Los resultados del análisis mediante el uso del método de fluorescencia de rayos X, demuestran que los elementos principales en la composición química de la ceniza son: Si (46.04%); Al (22.52%) and Fe (14.86%); los elementos medios, como K (4.57%); Ca (4.48%); Ti (3.74%); como elementos menores, S (1.61%); P (1.15%); Cu (0.08%); Cr (0.06%); Zn (0.05%) y como elementos de trazas, V (0.20%); Zr (0.18%); Mr (0.17%); Rb (0.03); Go (0.03); Mn (0.03); As (0.03); Y (0.02); Pb (0.023); Nb (0.018); Th (0.007).

-Con respecto a la composición físico-química de las muestras del efluente, fue posible determinar la presencia de cationes tóxicos, como: Zi, Cr, As, Ca, mediante el uso del método de espectrometría ICP-S, acoplado inductivamente.

-Las características físicas del efluente tiene un p.H de 7.29, con una conductividad eléctrica de 22.01 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y sólidos totales disueltos (TDS) de 11.11 mg/l.

-Los resultados de la interacción del efluente con la dosificación de 0.5 g, 1 g y 2 g, demostró la eficiencia de la ceniza, como agente absorbente en el proceso de separación de los cationes tóxicos.

- La dosificación eficiente para el tratamiento y separación de los cationes tóxicos, presentes en el efluente de la Compañía Mozal, debe ser de 2 g por 50 ml de efluente, debido a que el mismo tiene un p.H de 7.38, 21.64 $\mu\text{S}/\text{cm}$ de conductividad eléctrica y 10.23 mg/l de sólidos totales disueltos (TDS) y aún se logra separar los cationes tóxicos presentes en el efluente.

Referencias bibliográficas

Aurre, E.B., & Jaén, A.C. (2015). Extractive industries in Mozambique: threat or development opportunity? *Revista CIDOB d'afers internacionals*, 189-211.
<https://www.jstor.org/stable/43694806>

Borba, R.F. (2001). Carvão mineral. *Balanço mineral brasileiro*, (1), 1-19.
https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=Borba%2C+R.+F.+%282001%29.+Carv%C3%A3o+Mineral%3A+Balan%C3%A7o+mineral+brasileiro&btnG=

- Buitrago, P.A., & Rodríguez-Aparicio, J.A. (2021). Análisis ambiental de la minería de carbón en el ecosistema estratégico de páramo (Boyacá, Colombia). *Scientia et Technica*, 26(03), 398-405. <https://moodle2.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/24519>
- Campos, V., Morais, L.C., y Mafavisse, I.M. (2022). Síntesis de un supresor de polvo de origen vegetal y pruebas en carbón de Moatize, Mozambique. *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*, 36 (3), 207-215. <https://doi.org/10.15255/CABEQ.2022.2058>
- Chávez-García, E. (2022). Carbón mineral y biocarbón: de la revolución industrial a la captura de carbono. *Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería*, (123), 15-28. <https://contactos.izt.uam.mx/index.php/contactos/article/view/179>
- Fuentes López, H.J., Ferrucho Parra, C.C., & Martínez González, W.A. (2021). La minería y su impacto en el desarrollo económico en Colombia. *Apuntes del CENES*, 40(71), 189-216. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-30532021000100189&script=sci_arttext
- Gil, A.C. (2008). *Métodos e técnicas de pesquisa social*. 6. ed. Editora Atlas SA. http://www.feata.edu.br/downloads/revistas/economiaepesquisa/v3_artigo01_globalizacao.pdf
- Gil, A.C. (2019). *Como elaborar projecto de pesquisa*. 6ª Ed. São Paulo. Atlas. Brasil. https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/150/o/Anexo_C1_como_elaborar_projeto_de_pesquisa_-_antonio_carlos_gil.pdf
- González-Jiménez, N., Wilches-Wilches, M.R., Ramos-Parra, Y., Vargas-Rodríguez, L.J., Méndez-Arce, C., & Sandoval-Cuéllar, C. (2023). Contaminación de aire por material particulado y efectos en la salud pulmonar en población aledaña a plantas térmicas departamento de Boyacá (Colombia). *Revista Investigación en Salud Universidad de Boyacá*, 10(Suplemento 1), 22-22. <https://doi.org/10.24267/issn.2389-7325>
- José, D.S., & Sampaio, C.H. (2011). Estado da arte da mineração em Moçambique: Caso carvão de Moatize, Tete. *Universidade Federal do Rio Grande do Sul-RS, Brasil*. https://www.ufrgs.br/rede-carvao/Sess%C3%B5es_A7_A8_A9/A9_ARTIGO_03.pdf

- Lekgoba, T., Ntuli, F. y Falayi, T. (2021). Aplicación de cenizas volantes de carbón para el tratamiento de aguas residuales con una mezcla binaria de cobre y níquel. *Journal of Water Process Engineering*, 40, 101822. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101822>
- Macamo, R.D. (2022). Mineral resources and economic growth: evidence from the coal sector in Mozambique. *Espaço e Economia. Revista brasileira de geografia económica*, (24). <https://journals.openedition.org/espacoeconomia/22101>
- Marove, C.A., Tangviroon, P., Tabelin, C.B., & Igarashi, T. (2020). Lixiviación de elementos peligrosos del carbón y las cenizas de carbón de Mozambique. *Revista Africana de Ciencias de la Tierra*, 168, 103861. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2020.103861>
- Mello, P.A., Pereira, J.S., Mesko, M.F., Barin, J.S., & Flores, E.M. (2012). Sample preparation methods for subsequent determination of metals and non-metals in crude oil. A review. *Analytica chimica acta*, 746, 15-36. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2012.08.009>
- Ministério de Administração Estatal (MAE). (2005). *Perfil do Distrito de Boane, Província de Maputo. Maputo.* <https://www.portaldogoverno.gov.mz/por/content/download/2965/23877/version/..../Boane.pdf>
- Mushtaq, F., Zahid, M., Bhatti, I.A., Nasir, S. & Hussain, T. (2019). Posibles aplicaciones de las cenizas volantes de carbón en el tratamiento de aguas residuales. *Revista de gestión ambiental*, 240, 27-46. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.054>
- Nascimento, G.C., Domingui, L., Mello, J.M., Dal Magro, J., Riella, H.G., & Fiori, M.A. (2015). Caracterização físico-química da cinza de casca de arroz oriunda do processo termelétrico do sul de Santa Catarina-Brasil. *Ciência e Natura*, 37(3), 634-640. <https://www.redalyc.org/pdf/4675/467546194049.pdf>
- Wu, B., & Dzedzemoon, D.P. (2024). Evaluating the Environmental Sustainability of Silica Passivation for Acid Mine Drainage Treatment in Moatize's Coal Industry. *Applied Sciences*, 2(4), 13-23. <https://core.ac.uk/download/pdf/613198304.pdf>