

**Artículo Original**

***APLICACIÓN DE BACTERIAS ANAEROBIAS Y RECURSOS  
GEOLÓGICOS LOCALES EN TRATAMIENTO PASIVO DEL  
DRENAJE ÁCIDO EN MINA DE CARBÓN***

***APPLICATION OF ANAEROBIC BACTERIA AND LOCAL GEOLOGICAL  
RESOURCES IN PASSIVE TREATMENT OF ACID DRAINAGE  
IN COAL MINES***

Esneider Rodriguez Suarez<sup>1,2\*</sup> <https://orcid.org/0000-0001-8615-3259>  
Julio Omar Prieto García<sup>3</sup> <https://orcid.org/0000-0002-9279-4412>

<sup>1</sup> Facultad de Ciencias. Departamento de Química. Universidad Eduardo Mondlane.  
Maputo, Mozambique.

<sup>2</sup> Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Planeamiento Físico. Universidad UniTiva.  
Belo Horizonte, Boane, Mozambique.

<sup>3</sup> Departamento de Licenciatura en Química. Facultad de Química y Farmacia. Universidad Central  
"Marta Abreu" de Las Villas. Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

Recibido: Junio 26, 2023; Revisado: Julio 4, 2023; Aceptado: Julio 18, 2023

**RESUMEN**

**Introducción:**

La extracción de carbón mineral genera la formación de drenaje ácido de mina (DAM), que se produce cuando los minerales sulfurados, como la piritita, se oxidan en presencia de oxígeno y agua, lo que da lugar a la generación de ácido sulfúrico. La remediación del efluente ácido utilizando bacterias reductoras de sulfato proporciona la generación de alcalinidad lo que resulta en una disminución de la acidez que se debe a la reducción de sulfato y precipitación de metales en forma de sulfuros.

**Objetivo:**

Evaluar el uso de bacterias anaeróbicas y recursos geológicos locales en el tratamiento pasivo del drenaje ácido de la mina Benga, Provincia de Tete, Mozambique.

**Materiales y Métodos:**

Se realizó la caracterización físico-química del efluente, luego la instalación del biorreactor anaerobio utilizando como inóculo heces caprinas y materiales de origen geológico, seguido del período de aclimatación y posterior tratamiento del efluente. La evaluación de la remediación por el reactor bioquímico se efectuó en relación a



Este es un artículo de acceso abierto bajo una Licencia *Creative Commons* Atribución-No Comercial 4.0 Internacional, lo que permite copiar, distribuir, exhibir y representar la obra y hacer obras derivadas para fines no comerciales.

\* Autor para la correspondencia: Esneider Rodriguez, Email: [erodriguezsuarez2013@gmail.com](mailto:erodriguezsuarez2013@gmail.com)



diferentes tiempos de retención hidráulica, estudiando los parámetros pH, concentración de sulfatos y alcalinidad.

**Resultados y Discusión:**

El tiempo de retención hidráulica de 4 días mostró mayor eficiencia en la remoción del 80,90 % de sulfatos, y generó alcalinidad con 2860 mg.L<sup>-1</sup> de CaCO<sub>3</sub> y pH de 7,3. Los valores de pH aumentaron a un promedio de 6,90 (± 0,29). La remoción media final sulfatos de 69,21% (± 16) y alcalinidad de 2270 mg.L<sup>-1</sup> de CaCO<sub>3</sub>.

**Conclusiones:**

El reactor bioquímico generó una tasa de remoción de sulfato de 69,21% (± 16).

**Palabras clave:** biorreactor anaeróbico; carbón mineral; efluente ácido.

**ABSTRACT**

**Introduction:**

The extraction of mineral carbon generates the formation of acid mine drainage (AMD), which occurs when sulfur minerals, such as pyrite, oxidize in the presence of oxygen and water, which gives rise to the generation of sulfuric acid. The remediation of the acid effluent using sulfate-reducing bacteria provides the generation of alkalinity which results in a decrease in acidity due to the reduction of sulfate and precipitation of metals in the form of sulphurs.

**Objective:**

To evaluate the use of anaerobic bacteria and local geological resources in the passive treatment of the acid drainage of the Benga mine, Tete Province, Mozambique.

**Materials and Methods:**

The physical-chemical characterization of the effluent was carried out, followed by the installation of the anaerobic biorreactor using goat feces and materials of geological origin as inoculum, followed by the period of acclimatization and subsequent treatment of the effluent. The evaluation of the remediation by the biochemical reactor was carried out in relation to different times of hydraulic retention, studying the parameters pH, concentration of sulfates and alkalinity.

**Results and Discussion:**

Hydraulic retention time of 4 days showed greater efficiency in the removal of 80.90% of sulfates, and high alkalinity with 2860 mg.L<sup>-1</sup> of CaCO<sub>3</sub> and pH of 7.3. The pH values increased to an average of 6.9 (± 0.29). The average final sulfate removal of 69.21% (± 16), and alkalinity of 2270 mg.L<sup>-1</sup> of CaCO<sub>3</sub>.

**Conclusions:**

The biochemical reactor generates a sulfate removal rate of 69.21% (± 16).

**Keywords:** Anaerobic bioreactor; acid mine drainage; mineral Coal.

## 1. INTRODUCCIÓN

La minería del carbón mineral en Mozambique, concentrada en el distrito de Moatize, ha impulsado el desarrollo social y económico de la región y del país en general. La mina Benga, ubicada en el distrito de Moatize, se encuentran unos de los yacimientos

---

de carbón más grandes del país, explorando y procesando este bien mineral. En consecuencia, debido a estas actividades se generan relaves dispuestos en presas de contención.

El drenaje ácido es una solución acuosa caracterizada por valores de pH extremadamente bajos y diversidad de metales disueltos (Silva, 2010), como hierro, aluminio y metales pesados, como plomo, manganeso y cadmio, pudiendo incluso contener radionúclidos como torio y uranio (Rubio y Silva, 2009). Por otro lado, Kontopoulos, (1998) explica que, una vez creadas las condiciones necesarias, y a través de procesos químicos y biológicos, la formación de efluentes ácidos puede ocurrir por mecanismos directos o indirectos.

Además de la acidez, una característica del drenaje ácido de minas (DAM) es la presencia de altas cantidades de sulfatos (Rubio y Silva, 2009).

El objetivo del presente trabajo es evaluar el uso de bacterias anaeróbicas y recursos geológicos locales en el tratamiento pasivo del drenaje ácido de la mina Benga, Provincia de Tete, Mozambique.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

La toma de muestras del efluente del área de estudio se realizó en el tranque de relaves de carbón fino, en operación, ubicado a 1 km de la planta de procesamiento de la mina Benga, ubicada en el distrito de Moatize, provincia de Tete. En la tabla 1, se puede observar las coordenadas geográficas referentes a los puntos de toma de muestras.

Los ensayos se realizaron en los laboratorios de los departamentos de Química y Biología de la Facultad de Ciencias de la Universidad Eduardo Mondlane, en la ciudad de Maputo. La caracterización del efluente de la mina Benga se efectuó mediante estudios físico-químicos. Tras esto, se procedió al montaje del biorreactor anaeróbico con el posterior tratamiento del efluente ácido, seguido de la caracterización de este efluente después del tratamiento. En la última fase, se abrió el biorreactor anaeróbico y parte de la mezcla de reacción sirvió como muestra para análisis microbiológicos.

**Tabla 1.** Coordenadas geográficas de los puntos de recogida de muestras

| <i>Puntos de recogida de muestras</i> | <i>Coordenadas Geográficas</i> |                    |                    |
|---------------------------------------|--------------------------------|--------------------|--------------------|
|                                       | <i>Latitud (S)</i>             | <i>Latitud (S)</i> | <i>Latitud (S)</i> |
| Punto 1                               | 16°12'59.55"S                  | 33°40'47.83"E      | 146 m              |
| Punto 2                               | 16°13'1.51"S                   | 33°40'41.55"E      | 152 m              |

La evaluación del desempeño del biorreactor en el tratamiento de aguas ácidas del tranque de relaves finos de carbón en la mina de Benga, y la caracterización de este efluente se realizó mediante análisis físico-químicos, tales como pH, potencial redox, multielemental, y concentración de sulfato, tanto antes como después del tratamiento, con excepción de la alcalinidad, que se analizó solo para el efluente del biorreactor, y la conductividad y análisis multielemento.

La necesidad de creación de un ambiente reductor en el interior del biorreactor constituyó una preocupación, una vez que, la sobrevivencia de las bacterias reductoras de sulfatos (BRS) depende del mismo, así como la ocurrencia de la reacción de

reducción del sulfato y generación de alcalinidad a bicarbonato. El parámetro potencial de oxidación (Eh) sirve para determinar las condiciones del ambiente, si es reductor u oxidante, por este motivo fue evaluado solo en el final del período de aclimatación.

La determinación indirecta de la concentración de sulfato se realizó por el método gravimétrico, basado en la precipitación de azufre en forma de ion sulfato, por exceso de iones de Bario (II), en forma de sulfato de bario.

Para determinar las concentraciones de los elementos Fe, Mn, Si, Ag, Na, K, Mo, As, Zn, S, Ca, Al, Cu y Co, se utilizó la espectrometría de emisión atómica de plasma inducido (ICP AES), utilizando el espectrómetro ICPE – 9820 marca SHIMADZU.

El biorreactor anaerobio (ver figura 1) consistió en un recipiente cilíndrico con una capacidad de 10 litros y una altura de 37 cm, cerrado en la parte inferior y que contenía una tapa móvil en la parte superior. Al recipiente se acoplaron dos válvulas esféricas de ¾ de pulgadas, una en la tapa y otra en el fondo para permitir la entrada y salida del efluente, respectivamente.



**Figura 1.** Biorreactor anaeróbico

La columna interna del biorreactor se inició con una capa de caliza, seguida de capas de lodo pantanoso, una capa de estiércol de cabra, una capa de compost orgánico y finalmente las capas de aserrín de madera fina con arena, una capa de arena gruesa y capa de grava. Cada capa realiza una función crucial para obtener el resultado esperado. Luego del montaje, se saturó el biorreactor para iniciar el período de aclimatación, el cual tuvo una duración de veintiún (21) días, durante los cuales se monitorearon los valores de pH y Eh, a partir de muestras de 30 mL tomadas dos veces en cada una de las 3 semanas hasta el fondo de la válvula, para verificar que se crearon las condiciones para el crecimiento y supervivencia de los cultivos bacterias reductoras de sulfatos (BRS).

Además de los parámetros de pH y sulfato, se estudió la variación de la alcalinidad en relación a diferentes tiempos de retención hidráulica (HRT). El estudio utilizó este parámetro para determinar la capacidad de neutralización de ácidos y, por tanto, el equilibrio del medio ambiente en el reactor. La alcalinidad del sistema proviene de las reacciones de formación del ion  $\text{HCO}_3^-$ , precipitación del sulfito metálico y formación del ión hidrógeno.

Para la determinación de la alcalinidad se escogió el método volumétrico con detección potenciométrica, utilizándose un pH metro de marca Eutech Instruments, pH 700, con electrodo de vidrio combinado Ag/AgCl.

El día 37 de operación del bioreactor se abrió, permitiendo la toma de muestras de la mezcla reactiva contenida en esta celda de tratamiento de agua. Se realizaron muestreos en las capas de estiércol caprino, compost orgánico y lodo para verificar la presencia de bacterias sulfato reductoras. El enriquecimiento del BRS, contenido en las muestras de lodos anaerobios, se realizó en un medio de cultivo líquido Postgate C modificado.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla 2, se muestran los resultados referentes a los análisis físico químicos del efluente en la mina Benga.

**Tabla 2.** Resultados de la caracterización física y química del efluente de la mina Benga

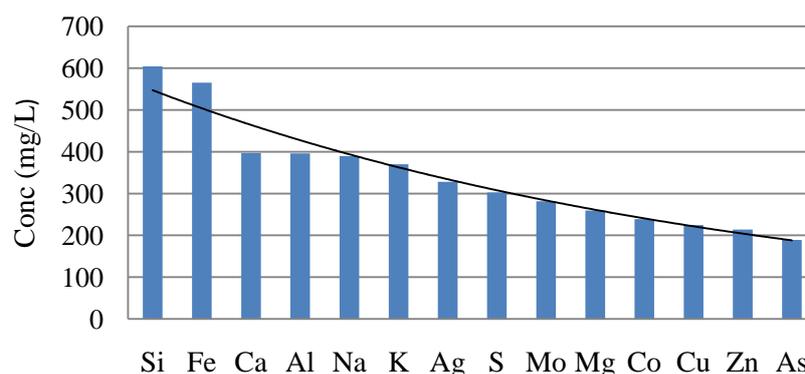
| <i>Parámetro físico</i>         | <i>Resultados</i>                     |                                   |
|---------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|
|                                 | <i>Análisis en el campo (In-situ)</i> | <i>Análisis en el laboratorio</i> |
| pH                              | 3,0                                   | 3,09                              |
| Conductividad eléctrica         | 4 mS/cm ( <i>in-situ</i> )            | 4,22 mS/cm                        |
| Potencial de oxi-reducción (Eh) | 196,70 mV                             |                                   |

Los valores de pH encontrados están muy por debajo de 7, es decir, en el rango ácido. El pH bajo está relacionado con la presencia de iones de hidrógeno libres ( $H^+$ ) originados en la reacción de oxidación de la pirita (presente en los residuos de carbón), que tiene como producto, además de los iones  $H^+$ , el ión sulfato ( $SO_4^{2-}$ ), además acidificando el medio (Gaikwad y Gupta, 2008).

Con respecto a la conductividad, los valores encontrados mediante análisis de laboratorio y de campo 4000  $\mu S/cm$  y 4220  $\mu S/cm$ . Este parámetro mide la capacidad del agua para conducir electricidad, dependiendo de la concentración de iones disueltos en el agua (BorMa y Soares, 2002).

Se evaluó el Eh, se obtuvo un valor positivo como resultado de esta evaluación, lo que indica condiciones oxidantes. Según Peixoto y col., (2009), el aumento del potencial redox es un indicio de la disolución de los sulfuros minerales y, consecuentemente, de la solubilización de los metales. En cuanto a la concentración de sustancias en el efluente, el sulfato tiene el valor más alto entre los diferentes elementos químicos, con una concentración equivalente al 25% del porcentaje total de sustancias químicas contenidas en el efluente.

La figura 2 presenta los resultados de la caracterización inicial del efluente ácido, en el que el Silicio y el Hierro son los elementos mayoritarios, destacándose por sus altas concentraciones en comparación con los demás elementos químicos.



**Figura 2.** Resultados de la caracterización del efluente por la espectrometría de emisión atómica de plasma inducido (ICP AES)

La alta concentración de hierro se puede explicar a través del análisis de las reacciones involucradas en el proceso de formación del drenaje ácido de minas. Con respecto a estos elementos químicos, incluyendo el Fe, Campagner y Silva, (2009) argumentan que su presencia en el efluente está relacionada con la calidad y composición de la materia prima extraída (cobertura donde se extrae el carbón, geología local), con los tipos de rocas y mineral en el sitio de formación. La Tabla 3 presenta los resultados promedios correspondientes al período de aclimatación del biorreactor anaerobio de tres semanas.

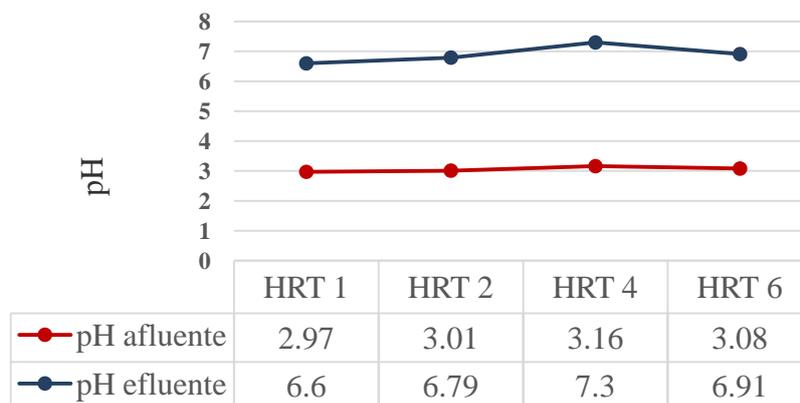
**Tabla 3.** Resultados de los análisis de pH e Eh durante el período de aclimatación del biorreactor anaerobio

| <i>Parámetro</i> | <i>Semana 1</i> |         | <i>Semana 2</i> |        | <i>Semana 3</i> |        |
|------------------|-----------------|---------|-----------------|--------|-----------------|--------|
| pH               | 6,50            | 7,68    | 6,72            | 6,54   | 6,44            | 7,33   |
| Eh               | -128,8          | -190,90 | -140,3          | -163,8 | -122,8          | -187,5 |

Como se puede apreciar, el valor de pH, encontrado antes de la aclimatación en el efluente del DAM que servía como afluente del biorreactor anaerobio, enmarcado en el rango ácido, aumentó durante la aclimatación, alcanzando valores entre 6,44 a 7,68. El aumento del pH favorece la supervivencia de BRS (pH óptimo para la supervivencia entre 5,0-8,2), y crea condiciones sostenibles para la ocurrencia de reacciones de precipitación de metales (Nursanto, 2017).

Los valores de Eh encontrados durante la aclimatación son negativos e inferiores a -100 mV, lo que indica que se crea el ambiente reductor necesario para el desarrollo de cultivos de bacterias anaerobias sulfato-reductoras, y la ocurrencia de reacciones que culminan en la remoción de sulfato.

Las figuras que siguen presentan resultados de estudios realizados en muestras recolectadas del biorreactor anaerobio en relación a diferentes tiempos de retención hidráulica para evaluar la eficiencia de esta celda de tratamiento de agua en términos de control de pH, remoción de sulfatos y generación de alcalinidad. La figura 3 muestra su variación para HRT igual a 1, 2, 4 y 6 días.

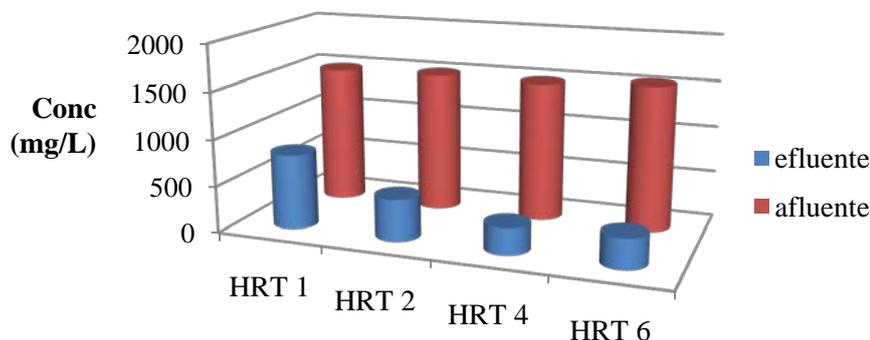


**Figura 3.** Variación del pH en relación al tiempo

Se puede observar que los valores de pH del efluente son superiores a los valores presentados para el afluyente en cada HRT. Los HRT 4 y 6 tienen valores de pH de efluentes más altos e incluso más cercanos a un pH neutro.

El efluente resultante debe cumplir con el Decreto 18 (2004) que establece el Reglamento de Emisión de Efluentes, y estipula un pH variable de 6,0-9,0 y además debe presentar características favorables para la sobrevivencia del BRS, de modo que el proceso de remediación sea continuo. El valor medio de pH del efluente durante el tiempo de funcionamiento fue de 6,9 ( $\pm 0,29$ ).

La figura 4 muestra la variación de la concentración de sulfatos en los tiempos de retención hidráulica estudiados.



**Figura 4.** Variación de la concentración de sulfato en los tiempos de retención hidráulica

Como se muestra en la figura 4, en los días finales de operación (HRT 4 y HRT 6) hay una tendencia a una mayor remoción de sulfatos. Alcanzando una concentración final mínima de 284,82  $\text{mg.L}^{-1}$  en HRT 4, equivalente al 80,90% de sulfato removido. Como concentración promedio de sulfato en el efluente se tiene un valor de 464,25 ( $\pm 102,30$ )  $\text{mg.L}^{-1}$  para el tiempo total de operación y el porcentaje promedio de remoción de sulfato de 69,21% ( $\pm 16$ ). Comparando los datos, se puede notar que el uso de un HRT inferior a 2 influye negativamente en la remoción de sulfatos y consecuentemente en la precipitación de metales, o sea, reduce la actividad del BRS.

En estudios similares, autores como Sampaio, (2015) obtuvo remociones de sulfatos de hasta 79,60% trabajando con concentraciones de aproximadamente 1500  $\text{mg.L}^{-1}$  de sulfatos, obteniendo mayor eficiencia en tiempos de retención entre 20 y 30 horas y menor eficiencia en HRT igual a 16 horas llegando a la conclusión que a menor HRT

disminuye la eficiencia de remediación por bacterias sulfato reductoras.

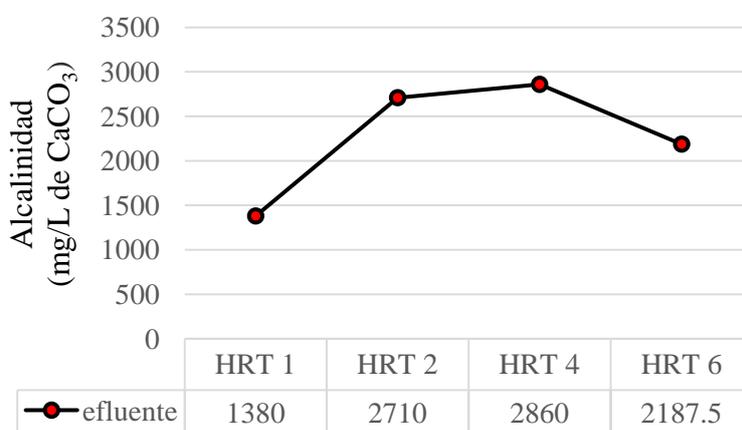
Otro factor importante que se debe considerar es el tipo de materia orgánica utilizada como inóculo para el cultivo de BRS. Vasconcelos, (1995), obtuvo una eficiencia del 82,0 % para la remoción de sulfatos, a partir de estiércol de la misma especie animal.

Normalmente, los excrementos de las especies caprinas tienen un recuento de microorganismos inferior al de los bovinos, lo que puede afectar la reproducción y la competencia contra los metanógenos en el caso de los reactores anaerobios (Amorim, 2002).

Tampoco se debe olvidar el factor temperatura, para el presente proyecto se registró un promedio de 25°C, mientras que en los estudios realizados por los autores antes mencionados se mantuvo una temperatura de operación constante de 35°C para acelerar el crecimiento del BRS en cultivos, lo que resulta en mejoras en la eliminación de sulfatos, el control del pH y la generación de alcalinidad, como se explicará más adelante.

La alcalinidad es de vital importancia en el análisis del tratamiento de efluentes, ya que mide la capacidad neutralizadora de ácidos del efluente resultante, dando una perspectiva de resistencia a posibles contaminaciones. En el caso de los reactores anaerobios, el ion  $\text{HCO}_3^-$  es el responsable de la generación de alcalinidad, es decir, la alcalinidad que genera el sistema en estudio es la del bicarbonato.

A continuación la figura 5 muestra los datos resultantes del estudio de la alcalinidad durante el tiempo de operación del reactor. Se puede notar que la alcalinidad generada fue de 2860  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  de  $\text{CaCO}_3$ , lo que indica una generación más productiva de iones bicarbonato producto de la remoción más eficiente de sulfato, resultando en una mayor elevación del valor de pH en el HRT 4.



**Figura 5.** Variación de la alcalinidad en el tiempo

Como se ilustra en el gráfico anterior, la generación de alcalinidad promedio es de alrededor de 2270  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  de  $\text{CaCO}_3$ . Según Nursanto (2017), la alcalinidad generada por este tipo de sistemas puede llegar a 5000  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  de  $\text{CaCO}_3$ .

La caracterización microbiológica permitió verificar la presencia de BRS, evidenciada por la formación de un precipitado negro, 29 horas después de haber colocado la solución en horno microbiológico.

#### 4. CONCLUSIONES

1. La caracterización química por espectrometría de emisión atómica reveló la presencia de los elementos químicos Fe, Al, Mn, Ag, Cu, Zn, Mo, Co, Na, K, Ca, Si, As y S en el efluente de la mina Benga, donde el hierro y silicio como elementos principales.
2. Se verificó, a través de la diferencia entre los valores de pH del afluente que fueron inferiores a los del efluente durante todo el período de operación del biorreactor anaeróbico, obteniendo un pH promedio del afluente igual a 3 contra 6,9 ( $\pm 0,29$ ) de pH del efluente, que el sistema creado demuestra eficiencia en la corrección de la acidez.
3. El reactor bioquímico generó una alta tasa de remoción de sulfatos con un porcentaje promedio de 69,21% ( $\pm 16$ ).
4. Para que el uso del biorreactor anaeróbico sea exitoso en el tratamiento del drenaje ácido de minas, es trascendental que se mantengan las condiciones óptimas para su funcionamiento y la supervivencia de las bacterias sulfato-reductoras, tales como valores de pH entre 5 y 8 (mantenidos por el propio biorreactor a través de la reacción, de bicarbonato y/o presencia de arena calcárea), potencial redox inferior a -100 mV, y presencia de una fuente de sulfato y materia orgánica.
5. El tiempo de retención de cuatro (4) días demostró ser más eficiente en la remediación en términos de remoción de sulfatos, removiendo el 80,90% de su concentración, y consecuentemente en términos de generación de alcalinidad y elevación del valor de pH.

#### REFERENCIAS

- Amorim, A.C., Caracterização dos dejectos de caprinos: reciclagem energética e de nutrientes., Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias para obtenção do Título de Mestre em Produção Animal, Universidade Estadual Paulista, Brazil, 2002. <http://hdl.handle.net/11449/96604>
- Borma, L., de S., Soares, P.S.M., Drenagem ácida e gestão de resíduos sólidos de mineração. In: Trindade., R. B. E., Barbosa Filho, O. Extração de ouro: princípios, tecnologia e meio ambiente. CETEM/MCT, Rio de Janeiro 2002. <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/1232>
- Campagner, V.P, e Luiz-Silva, W., Processos físico-químicos em drenagem ácida de mina em mineração de carvão no sul do Brasil., Química Nova, Vol. 32, No. 1, 2009, pp. 146-152. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422009000100028>
- Decreto 18/2004., Regulamento sobre padrões de qualidade ambiental e de emissão de efluentes., Maputo: República de Moçambique, 2 de Junho de 2004, pp. 6-29. [http://www.impacto.co.mz/wp-content/themes/Arpora2\\_1\\_0/pdf/Padroes%20de%20Qualidade/DECRET~3.PDF](http://www.impacto.co.mz/wp-content/themes/Arpora2_1_0/pdf/Padroes%20de%20Qualidade/DECRET~3.PDF)
- Gaikwad, R.W., & Gupta, D.V., Review on removal of heavy metals from acid mine drainage., Applied Ecology and Environmental Research, Vol. 6, No. 3, 2008, pp. 79-96. [https://www.aloki.hu/pdf/0603\\_081098.pdf](https://www.aloki.hu/pdf/0603_081098.pdf)
- Kontopoulos, A., Acid mine drainage control, In: Effluent Treatment in the Mining
-

- Industry., University of Concepción, Edmundo Larenas, Chile, 1998, pp. 57-118. [https://www.scirp.org/\(S\(351jmbntvnst1aadkpozje\)\)/reference/referencespapers.aspx?referenceid=1029891](https://www.scirp.org/(S(351jmbntvnst1aadkpozje))/reference/referencespapers.aspx?referenceid=1029891)
- Nursanto, A., Design and cost evaluation of anaerobic bioreactor for industrial waste., Master's Thesis, Faculty of Science and Technology, University of Stavanger, Norway, 2017, pp. 4-13. <https://uis.brage.unit.no/uis-xmlui/handle/11250/2458369>
- Peixoto, G.H., Santos, L.G., e de Oliveira, D.M., Influência do biossurfactante ramnolípido na biolixiviação de minério primário de cobre., Memórias do XIII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, Rio de Janeiro, 2009, pp. 74-80. <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/478/1/12-Gabriel%20Henrique%20Costa%20Peixoto.pdf>
- Rubio, J., e Silva, R., Tratamento de drenagem ácida de minas de carvão: Tendências tecnológicas., Laboratório de Tecnologia Mineral e Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2012. <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/212987/001117200>
- Silva, J.A.L., Uma discussão sobre desertificação: caso do município de Pedra Lavrada-PB., Trabalho de Conclusão de Curso, Graduação em Geografia, Universidade Estadual da Paraíba, Guarabira, Brazil, 2010. <http://dspace.bc.uepb.edu.br:8080/xmlui/handle/123456789/5084>
- Sampaio, G.F., Tratamento de água residuária ácida proveniente de mina utilizando soro de leite como doador de elétrons., Dissertação Mestrado em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Alfenas, Minas Gerais, Brazil, 2015. [https://www.oasisbr.ibict.br/vufind/Record/BRCRIS\\_450b3fbb9b060b463a9e93f6ba45400](https://www.oasisbr.ibict.br/vufind/Record/BRCRIS_450b3fbb9b060b463a9e93f6ba45400)
- Vasconcelos, L., Contribuição para o conhecimento dos carvões na Bacia Carbonífera de Moatize, Província de Tete, República de Moçambique, Tese de Doutorado, Universidade do Porto, Portugal, 1995. [https://biblioteca.biofund.org.mz/biblioteca\\_virtual/contribuicao-para-o-conhecimento-dos-carvoes-da-bacia-carbonifera-de-moatize-provincia-de-tete-republica-de-mocambique-volume-i-texto/](https://biblioteca.biofund.org.mz/biblioteca_virtual/contribuicao-para-o-conhecimento-dos-carvoes-da-bacia-carbonifera-de-moatize-provincia-de-tete-republica-de-mocambique-volume-i-texto/)

## **CONFLICTO DE INTERÉS**

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

## **CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES**

- M.Sc. Esneider Rodriguez Suarez. Gestión de proyectos, conceptualización, redacción - primera redacción, investigación, metodología, software.
  - Dr.C. Julio Omar Prieto García. Redacción- revisión y edición, metodología, validación.
-