

Principales microorganismos sulfato reductores (MSR) de reactores anaerobios alimentados con efluentes ácidos, una revisión bibliográfica

Main sulfate-reducing microorganisms (SRM) present in anaerobic reactors fed with acid effluents, a review

*Donovan Enrique Álvarez-Márquez**, *Marisela Bernal-González***,
*María del Carmen Durán-Domínguez-de-Bazúa****

DOI: 10.15446/rev.colomb.biote.v24n1.100963

RESUMEN

En esta investigación bibliográfica se encontraron reportes sobre una gran variedad de especies responsables de precipitar a cuatro metales de interés (Cu, Pb, Zn y Fe). En la mayoría de las investigaciones no solamente se considera la precipitación de estos metales, sino también la de otros elementos que están presentes en cada efluente estudiado. Los artículos aquí mencionados tienen una relación directa con el efluente proveniente de la operación unitaria de flotación. Aportan conocimiento acerca del proceso de sulfato-reducción, comprendiendo el mecanismo mediante microorganismos con características específicas, especialmente su versatilidad pues se desarrollan en diferentes ecosistemas. Se muestra que varias especies, como *Desulfobacter* o *Desulfovibrio* son comunes pues tienen condiciones relativamente sencillas para desarrollarse. Los microorganismos sulfato reductores (MSR) son eficientes para reducir la acidez del agua (de la operación unitaria de flotación de una mina, de cocinas, de corrientes marinas, etc.). También lo son para precipitar diferentes elementos pues no requieren de algún agente externo salvo en contadas ocasiones donde debe actuar un catalizador. Hay investigaciones sobre los nutrientes que deben adicionarse para incrementar su actividad. Los reportes de investigación revisados identificaron las variables a controlar para obtener buenos resultados en la remoción de metales y menores impactos en el ambiente. Es de gran importancia el desarrollo de proyectos que tomen en cuenta un sistema natural, como la degradación anaerobia, para alcanzar un punto en el cual la tecnología y el ambiente puedan complementarse logrando bienes de consumo necesarios para la población sin causar daños irreparables a la naturaleza.

Palabras clave: Microorganismos sulfato reductores, tratamiento de agua, drenaje ácido de mina.

* Pas. I.Q. Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, Facultad de Química, Departamento de Ingeniería Química, Laboratorios 301, 302 y 303 de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental, Conjunto "E", Edificio E-3 Alimentos y Química Ambiental, Ciudad Universitaria, Av. Universidad 3000, 04510 Ciudad de México, México.
Correo-e (e-mail): donovanalvarez11@comunidad.unam.mx, autor a quien debe dirigirse la correspondencia.

** Dra. en Ing. Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, Facultad de Química, Departamento de Ingeniería Química, Laboratorios 301, 302 y 303 de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental, Conjunto "E", Edificio E-3 Alimentos y Química Ambiental, Ciudad Universitaria, Av. Universidad 3000, 04510 Ciudad de México, México.
Correo-e (e-mail): marisela_bernal2000@yahoo.com.mx.

*** Dr.-Ing. Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, Facultad de Química, Departamento de Ingeniería Química, Laboratorios 301, 302 y 303 de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental, Conjunto "E", Edificio E-3 Alimentos y Química Ambiental, Ciudad Universitaria, Av. Universidad 3000, 04510 Ciudad de México, México.
Correo-e (e-mail): mcduran@quimica.unam.mx.

ABSTRACT

In this bibliographical research, reports were found on a great variety of species responsible for precipitating four metals of interest (Cu, Pb, Zn and Fe). In most of the investigations, not only the precipitation of these metals is considered, but also that of other elements that are present in each effluent studied. The items mentioned here have a direct relationship with the effluent from the flotation unit operation. They provide knowledge about the sulfate-reduction process, understanding the mechanism through microorganisms with specific characteristics, especially their versatility as they develop in different ecosystems. It is shown that several species, such as *Desulfobacter* or *Desulfovibrio*, are common because they have relatively simple conditions to develop. Sulfate-reducing microorganisms (SRM) are efficient in reducing the acidity of water (from the flotation unit operation of a mine, kitchens, ocean currents, etc.). They are also used to precipitate different elements since they do not require any external agent except on rare occasions when a catalyst must act. There is research on the nutrients that should be added to increase its activity. The research reports reviewed identified the variables to control to obtain good results in the removal of metals and less impact on the environment. The development of projects that take into account a natural system, such as anaerobic degradation, is of great importance in order to reach a point where technology and the environment can complement each other, achieving necessary consumer goods for the population without causing irreparable damage to nature.

Keywords: Sulfate-reducing microorganisms, water treatment, acid mine drainage.

Recibido: febrero 9 de 2022 **Aprobado:** mayo 3 de 2022

INTRODUCCIÓN

Desde tiempos prehispánicos, “la minería ha sido un factor de enorme importancia en el suceder de la historia económica de México, en la apropiación del territorio y en la fundación de los principales centros urbanos del país durante la colonia” (Coll-Hurtado *et al.*, 2002). A partir de 1961, cuando la Ley de Mexicanización de la minería fue expedida, las riendas del sector minero fueron tomadas “ya no por un dominio externo sino por el Estado y capital mexicanos y rápidamente se fue develando el trasfondo político que este cambio traería, el cual iba enfocado hacia la fortificación y potenciación del capital minero ‘mexicanizado’ convirtiéndolo así en una de las actividades más exitosas del país” (Wise y Mendoza, 2001). Fue a partir de 1990, que hubo una reestructuración de la legislación minera “aumentando la participación del sector privado, disminuyendo el papel del Estado como inversionista y como rector de esta actividad económica ampliando así la participación de la inversión extranjera directa” (Guevara-González, 2016). Aunque el crecimiento de la actividad minera no necesariamente significa algo completamente positivo, pues trae consigo consecuencias en las condiciones de vida de las poblaciones en las cuales se ha asentado dicha actividad y sus consecuencias son en su mayoría de carácter ambiental.

Uno de los principales problemas que la actividad minera ha generado es el “despojo hídrico, en el cual se sobre-explotan los acuíferos y se contamina el agua así como se genera una mayor producción de residuos sólidos y aguas ácidas” (Guzmán, 2016). Para enfrentar esta problemática se han presentado varias opciones dentro de las cuales destaca el tratamiento de aguas residuales con microorganismos sulfato-reductores (MSR), ya que se sabe que “en condiciones anaerobias oxidan com-

puestos orgánicos simples y liberan H_2S y HCO_3^- en presencia de SO_4^- y H^+ , los cuales son comunes en el agua ácida” (Dvorak *et al.*, 1992).

El H_2S reacciona con los contaminantes metálicos precipitándolos como sulfuros metálicos. “Este proceso es de bajo costo y de gran importancia ya que remueve los metales del agua, aumenta el pH y, debido a la alcalinidad que se genera por las bacterias, se reduce la acidez” (Durán-Barrantes *et al.*, 2000).

El medio ácido de interés en esta investigación son las aguas ácidas finales provenientes de la operación unitaria de flotación de la industria minera, las cuales son originadas mediante la “oxidación microbiológica de sulfuros metálicos gracias a las bacterias ferro-oxidantes del género *Thiobacillus*” (Durán-Barrantes *et al.*, 2000). El proceso de flotación es parte de un procedimiento de enriquecimiento de algunos minerales (sulfuros de Cu, Pb, Zn, etc.) y en el cual el mineral se ve separado debido tanto a interacciones fisicoquímicas como a procesos de reducción de tamaño. De esta forma “se puede concentrar el metal de interés mientras que el resto de material sin valor (relave) puede ser descartado”. Este procedimiento es conocido como concentración y su finalidad es la de obtener un material concentrado, para que se pueda reducir el costo de su transporte y tratamiento. “Las etapas que conforman el mismo son la recepción de materiales, ‘chancado’, molienda, flotación y secado de concentrados” (EMDP, 2000).

Hipótesis

Las especies de microorganismos sulfato reductores (MSR) convierten los sulfatos en sulfuros, precipitando las sales metálicas de Pb, Zn, Cu y Fe provenientes de

un efluente de la operación unitaria de flotación. Por tanto, es de suma importancia estudiar a las especies de microorganismos sulfato-reductores (MSR) que no presenten una alta sensibilidad a los metales pesados y a un valor de pH bajo, que son característicos de un efluente proveniente de la operación unitaria de flotación de la industria minera.

OBJETIVOS

Objetivo general

Realizar una revisión bibliográfica de las especies de microorganismos sulfato-reductores (MSR) presentes en reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA) alimentados con efluentes ácidos, que provienen de la operación unitaria de flotación de una mina cooperante, conteniendo bajas concentraciones de Pb, Zn, Cu y Fe aprovechando la capacidad de las especies MSR y convirtiendo los sulfatos en sulfuros, precipitando a estas sales como sulfuros metálicos y logrando así la recirculación del agua ya tratada a la operación unitaria de flotación.

Objetivos particulares

- Revisar en la literatura cuáles son las principales especies de microorganismos sulfato-reductores (MSR), responsables de la precipitación de metales como el Pb, Zn y Cu y del Fe en un sistema anaerobio.
- Comprender los mecanismos de precipitación de los metales disueltos como sulfuros metálicos en el agua proveniente de la operación unitaria de flotación interpretando la eficiencia de remoción de cada metal en un sistema anaerobio.
- Distinguir cuáles son los parámetros de operación de mayor influencia en un sistema anaerobio logrando la mayor precipitación de metales como el Pb, Zn y Cu y del Fe.

METODOLOGÍA

Se revisó todo tipo de textos encontrados en la literatura científica, relacionados con el tema de MSR aunque no trataran en su totalidad sobre la precipitación de metales o el tratamiento de aguas residuales. Debido a esta variedad se obtuvo una mejor comprensión del tema en cuestión ya que se abordó desde diferentes puntos de vista y se denotaron aspectos importantes dentro de cada situación. La mayor parte de la investigación fue realizada en documentos digitales incluyendo tesis, artículos científicos, revistas, investigaciones y estudios en laboratorios en las plataformas BIDI (UNAM), Redalyc, Repositorio UDES (Universidad de Santander), DSpace, Science Direct, SEDICI, Google Académico, SciELO, Elsevier, Repositorio IPISYT, etc. (ver Glosario).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El Pb y Zn son obtenidos mayormente a partir de un mineral llamado galena que es el mineral de sulfuro más importante y generalmente se trata de forma pirometalúrgica. Sin embargo, la fundición de plomo enfrenta dificultades con respecto de las regulaciones ambientales. "Por lo tanto, la recuperación hidrometalúrgica de plomo de la galena puede ser un proceso prometedor con la formación de azufre elemental ambientalmente inerte en lugar de dióxido de azufre" (Cedillo-Salazar *et al.*, 2017). En la Tabla 1 se muestran las publicaciones revisadas de la bibliografía relacionadas con los procesos utilizados para obtener concentrados de los minerales Pb, Zn y Cu, todos ellos acompañados de Fe.

En la Tabla 2 se presenta la taxonomía de los géneros de los MSR más importantes involucrados en los procesos de la sulfatorreducción y más adelante se describen más ampliamente algunos de ellos (Kuever *et al.*, 2015).

Desulfococcus: El intervalo de temperatura óptimo para su desarrollo está entre 28 y 35°C, mientras que el intervalo de pH óptimo es de 6.7 a 7.6. El desarrollo ocurre en medios simples y definidos que contienen un compuesto reductor (generalmente sulfuro) y vitaminas. Las colonias en medios de agar anóxicos son blanquecinas a amarillentas (a veces con apariencia grisácea) y tienden a ser viscosas. No se han descrito especies termófilas y se presentan en lodo anóxico de agua dulce, agua salobre y hábitats marinos; También se presentan en los lodos de los sistemas anaerobios de aguas residuales (Kuever *et al.*, 2015).

Desulfotomaculum: Su desarrollo ocurre en medios definidos simples que contienen sulfuro como reductor. Algunas especies requieren vitaminas o extracto de levadura. Estas especies pueden fijar N₂. El intervalo de temperatura óptimo para su desarrollo es de 30 a 37°C para especies mesófilas y de 50 a 65°C para especies termófilas. Por otro lado, su pH óptimo para el crecimiento es de 6.5 a 7.5. Estas especies son comunes en sedimentos anóxicos de agua dulce, salobre o marinos (Kuever *et al.*, 2015).

Desulfobacter: Su proliferación ocurre en medios definidos simples que contienen sulfuro como reductor. La mayoría de las especies requieren vitaminas. Muchos miembros de este género pueden fijar N₂. La adición de ≥7 g de NaCl y ≥1 g de MgCl₂·6H₂O por litro de medio, puede ser estimulante y/o necesario para su desarrollo. El intervalo de temperatura óptimo es de 28 a 34°C. No se han descrito especies termófilas. El pH óptimo es de 6.5 a 7.4. La oxidación de acetil-CoA y la fijación de CO₂ con H₂ como donante de electrones en *D. hydrogenophilus* se

Tabla 1. Diferentes procesos utilizados para obtener concentrados de los minerales Pb, Zn y Cu, todos ellos

Objetivo	Proceso	Eficiencia	Referencia
Determinar los parámetros que intervienen en el proceso de flotación del Zn	Flotación	Recuperación de zinc del 90.58% ¹	Castro-Chamorro, 2005
Evaluar la extracción de plomo y cadmio de vajilla cerámica vidriada	La lixiviación se aplicó en cuatro repeticiones, en cada una de las extracciones se utilizó ácido acético al 4%(V/V) durante 24 horas a 22°C	Entre el 50 y el 93% de plomo en los lixiviados	Flores et al., 2016
Recuperar óptimamente por flotación los metales de plomo y zinc	Flotación	“Recuperaciones máximas de Zn y Pb de 94 y 83%, respectivamente”	Gamarra-Maldonado, 2019
Plantear la hipótesis de que el Pb-210 está interactuando con los sulfuros de cobre y esta interacción está contribuyendo a la ineficacia aumentando el rechazo de la flotación	Flotación	“La recuperación por flotación (del Pb) fue de 89.8%”	Hamilton et al., 2020
Usar nanopartículas y micropartículas de lignina como recolectores sostenibles y amigables con el ambiente	Flotación	“Recuperaciones totales de hasta 91, 85 y 98% para Cu, Pb y Zn, respectivamente”	Hrůzová et al., 2020
Determinar los parámetros operativos que influyen en la recuperación por flotación de la galena a partir de un mineral de bajo grado de Pb - Zn	Flotación	Incremento de la recuperación del mineral de plomo del 60 al 80%	León-Arroyo y Dianderas-Mandujano, 2019
Recuperar los metales objetivo de un concentrado de sulfuro a granel (2.9% Cu, 7.4% Zn, 2.5% Pb, 67 ppm Ag y 37.2% Fe)	Hidrometalúrgico integral (a) Lixiviación férrica, (b) Lixiviación con salmuera caliente	“Las extracciones fueron superiores al 95% para Zn, Cu y Pb, así como, la recuperación total de catalizador”	Lorenzo-Tallafigo et al., 2021
Recuperar el cobre contenido en escoria de cobre mediante flotación	Flotación	“Recuperaciones de 59.2% en escorias del horno de reverbero (HR) y 86.8% para la escoria de convertidor teniente (CT)”	Valderrama et al., 2018
Modificar el pH económica y eficazmente mediante la cal en el proceso de flotación selectiva de los principales minerales sulfurados	Flotación	“El consumo de la cal fue de 5 kg/t de mineral, especialmente para minerales con alto contenido de piritita y/o cuando la flotación se realiza en agua de mar”	Zanin et al., 2019
Obtener concentrados de 7.79% Cu, 22.00% de Pb, 4.81% de Zn, 8.24% de S y 12.15% de CaO; el sulfuro de cobre representó el 76.97% del cobre, el sulfuro de plomo el 25.55% del plomo y el sulfuro de zinc el 67.66% del zinc	Flotación	“En estas condiciones, los grados de lixiviación de Cu y Zn fueron del 87.43% y 64.38%, respectivamente”	Zhang et al., 2019

¹ En esta investigación los °C y % van junto a los guarismos. Se usa el punto decimal de acuerdo con la normativa mexicana (DOF, 2009).

logra mediante un ciclo de ácido tricarbóxico, TCA, modificado. Las especies de *Desulfobacter* son más comunes en sedimentos marinos o salobres anóxicos, pero algunos

tipos pueden encontrarse en sedimentos anóxicos de agua dulce o en lodos activados (Kuever et al., 2015).

Tabla 2. Taxonomía de la mayoría de las poblaciones microbianas detectadas durante el tratamiento anaerobio (Modificado de Di-Maria, 2017).

Dominio	Filo	Clase	Orden	Familia	Género
Archaea	Euryarchaeota	Methanobacteria Methanomicrobia	Methanobacteriales Methanomicrobiales Methanosarcinales	Methanomicrobiaceae Methanobacteriaceae Methanosaetaceae	<i>Methanobacterium</i> <i>Methanobrevibacter</i> <i>Methanoculleus</i> <i>Methanogenium</i> <i>Methanosaeta</i> <i>Methanospirillum</i> <i>Methanothermobacter</i>
Bacteria	Actinobacteria Bacteroidetes Firmicutes Proteobacteria Spirochaetes Synergistetes Tenericutes Thermotogae	Actinobacteria Alphaproteobacteria Bacilli Betaproteobacteria Clostridia Deltaproteobacteria Flavobacteria Gammaproteobacteria Methanomicrobia Mollicutes Sphingobacteria Synergistria Thermotogae	Acholeplasmatales Actinomycetales Alteromonadales Bacillales Burkholderiales Chromatiales Clostridiales Desulfovibrionales Flavobacteriales Myxococcales Natranaerobiales Oceanospirillales Pseudomonadales Sphingobacteriales Sphingomonadales Spirochaetales Synergistales Syntrophobacteriales Thermoanaerobacteriales Thermotogales	Acholeplasmataceae Anaerobrancaceae Bacillaceae Bacteroidaceae Clostridiaceae Desulfovibrionaceae Dethiosulfovibrionaceae Ectothiorhodospiraceae Flavobacteriaceae Flexibacteriaceae Heliobacteriaceae Idiomarinaceae Paenibacillaceae Peptococcaceae Pseudomonadaceae Sphingomonadaceae Thermoanaerobacteriaceae Thermotogaceae Thermovenabulum Veillonellaceae	<i>Acholeplasma</i> <i>Ammoniflex</i> <i>Anaerobranca</i> <i>Bacillus</i> <i>Caldicellulosiruptor</i> <i>Clostridium</i> <i>Desulfovibrio</i> <i>Desulfurispora</i> <i>Dethiosulfovibrio</i> <i>Desulfococcus</i> <i>Desulfotomaculum</i> <i>Desulfobacter</i> <i>Desulfobulbus</i> <i>Desulfobacterium</i> <i>Emticicia</i> <i>Eubacterium</i> <i>Heliorestis</i> <i>Moorella</i> <i>Pedobacter</i> <i>Pelotomaculum</i> <i>Peptococcus</i> <i>Petrotoga</i> <i>Propionispora</i> <i>Pseudidiomarina</i> <i>Pseudomonas</i> <i>Selenomonas</i> <i>Syntrophomonas</i> <i>Thermoanaerobacter</i> <i>Thermovenabulum</i> <i>Treponema</i>

Desulfobulbus: El sulfato y también el sulfito o el tiosulfato sirven como aceptores terminales de electrones y se reducen a H₂S. El azufre no se reduce. En ausencia de un aceptor de electrones externo, el desarrollo puede ocurrir por degradación de lactato, piruvato y etanol (+ CO₂), malato o fumarato. El intervalo de pH óptimo es de 6.6 a 7.5. En cuanto a la temperatura óptima es de 25 a 40°C. No se conocen especies termofílicas. Se requieren medios que contengan un reductor y p-aminobenzoato para su proliferación. Las colonias en medio de agar anaerobio son blanquecinas a grisáceas y lisas. Se presentan en zonas anóxicas de agua dulce, agua salobre y hábitats marinos. También se han aislado del contenido del rumen, estiércol de animales y lodos de plantas depuradoras de agua (Kuever *et al.*, 2015).

Desulfobacterium: Las desulfobacterias se encuentran muy extendidas en sedimentos marinos y salobres. El

sulfato y otros compuestos de azufre oxidados sirven como aceptores terminales de electrones y se reducen a H₂S. El azufre y el nitrato no se utilizan como aceptores terminales de electrones. Algunas especies pueden proliferar lentamente en ausencia de un aceptor de electrones externo por degradación de lactato, piruvato, malato y fumarato. Su temperatura óptima es de 26 a 29°C. Se requieren medios anóxicos (con sulfuro como reductor) y vitaminas para el crecimiento. Las especies de *Desulfobacterium* requieren concentraciones marinas o salobres de NaCl y MgCl₂. Las células contienen citocromos de tipo b y c. Se observa comúnmente la actividad del monóxido de carbono deshidrogenasa, lo que indica el funcionamiento de la vía anaerobia C1 (vía del monóxido de carbono deshidrogenasa o vía Wood) para la oxidación completa de la acetil-CoA o para la fijación de CO₂ durante el desarrollo autótrofo. Las especies de *Desulfobacterium* están muy extendidas en sedimentos

marinos o salobres, pero ocurren con menos frecuencia en hábitats de agua dulce. La eficiencia de la reducción de sulfato es del 89, 91 y 91% utilizando valores de pH de 2, 4 y 6, respectivamente. Esto indica que la mayor reducción de sulfato está en el medio con pH 4 y pH 6. Además, *Desulfobacterium* proliferando en medio a valor de pH de 4 tiene una mejor eficiencia de reducción de sulfato (93%) en comparación con otros aislados de MSR (Kuever *et al.*, 2015).

Principales especies de microorganismos sulfato reductores (MSR), responsables de realizar la precipitación del Pb

En general, las especies más predominantes en la precipitación de Pb son *Desulfovibrio* y *Desulfosarcina*, aunque ambas tienen formas distintas (espiral y tétradas, respectivamente), “ambas son anaerobias, utilizan SO_4^{2-} como aceptor de electrones y presentan sensibilidad al ser expuestas a temperaturas de 100°C durante 5 minutos, siendo esto último necesario para diferenciación al *Desulfovibrio* de *Desulfomonas*” (Palomino-Cadenas, 2007). Además de esto se ha reportado que “el grupo microbiano más competitivo en las desembocaduras en el mar y de ríos amplios es el *Desulfovibrio*, cuando ésta forma parte del consorcio *Desulfobacter - Desulfobulbus*” (Laanbroek *et al.*, 1984). “Este grupo posee una temperatura óptima de desarrollo de entre 15 y 35°C” (Monroy-Cruz, 2014). En la Tabla 3 se muestra la revisión bibliográfica de las diferentes especies de MSR responsables de la precipitación del plomo.

Principales especies de microorganismos sulfato reductores (MSR), encargados de realizar la precipitación del Zn

En este caso, “la temperatura óptima de proliferación para la mayoría de bacterias que precipitan al zinc oscila entre los 25 y 40°C” (Castro *et al.*, 2000). En la mayoría de los trabajos estudiados el microorganismo más común fue el *Desulfotomaculum* el cual tiene la característica de “formar esporas permitiéndole así volverse resistente a condiciones adversas pudiendo subsistir en una gran cantidad de medios” (Londry *et al.*, 1997; Castro *et al.*, 2000). Generalmente este subgrupo “se encuentra en cualquier tipo de ambiente natural, sedimentos, aguas e incluso en el tracto digestivo de algunos animales recién nacidos” (Deplancke *et al.*, 2000). En la Tabla 4 se muestran los MSR encargados de realizar la precipitación de Zn.

Principales especies de microorganismos sulfato reductores (MSR) encargados de realizar la precipitación del Cu

Para el caso de la precipitación del cobre el género más común es el *Desulfobacterium*. Es un grupo versátil con una forma ovalada casi esférica, “tiene capacidades especiales en cuanto a degradación de compuestos orgánicos como por ejemplo la descomposición de hidrocarburos” (Sánchez-Alarcón, 2005; Van der Maarel, 1996). Las especies en este género son comúnmente marinas y requieren de elevadas concentraciones de cloruro de sodio. Además de esto, “el *Desulfobacterium* y el *Desulfobacter* comparte la característica de ser potencialmen-

Tabla 3. MSR responsables de la precipitación del plomo.

Objetivo	MSR	Eficiencia	Referencia
Evaluar la influencia de la acidez en la remoción de plomo (Pb^{2+}) mediante MSR	<i>Desulfovibrio</i> y <i>Desulfosarcina</i>	“A nivel de laboratorio se logró la remoción de 99.23% de plomo”	Basilio-Tavera, 2015
Precipitar metales pesados con sulfuro de hidrógeno biogénico	<i>Desulfovibrio</i> , <i>Desulfotomaculum</i> , <i>Archaeoglobus</i> , <i>Desulfomicrobium</i> , <i>Desulfomonile</i> , <i>Desulfobulbus</i> , <i>Desulfobotulus</i> , <i>Desulfobacula</i> , <i>Thermodesulfobacterium</i>	“Remoción de Cu del 92%, 90% de Pb y 95 % de Zn”	Chávez-Lizárraga <i>et al.</i> , 2006
Usar sistemas de humedales para la biorremediación de drenajes ácidos de mina mediante MSR	<i>Desulfovibrio</i> y <i>Desulfosarcina</i>	“La remoción anual para el Fe es de 85%, Pb de 69% y Zn de 92%”	Palomino-Cadenas, 2007
Precipitar Pb^{2+} mediante MSR en un reactor en régimen continuo	<i>Desulfovibrio desulfuricans</i>	“Se logró la remoción del 98.4% de Pb”	Velasco <i>et al.</i> , 2005
Evaluar la formación biológica de sulfuro y precipitación de metales pesados utilizando MSR	<i>Desulfovibrio</i> , <i>Desulfomonas</i> , <i>Desulfotomaculum</i> , <i>Desulfobulbus</i> , <i>Thermodesulfobacterium</i>	“La eficiencia de remoción de plomo soluble fue de 94%”	Velasco y Revah, 2007

Tabla 4. MSR responsables de la precipitación del zinc.

Meta	MSR	Eficiencia	Referencia
Remoción de metales pesados mediante MSR	<i>Desulfovibrio, Desulfotomaculum, Archaeoglobus, Desulfomicrobium, Desulfomonile, Desulfobulbus, Desulfobotulus, Desulfobacula, Thermodesulfobacterium</i>	Las eficiencias de remoción alcanzaron el 100%. Las concentraciones iniciales fueron de 200 mg/L para Cu y 150 mg/L para Ni y Zn	Bayoumy et al., 1999
Tratamiento de metales mediante MSR	<i>Desulfovibrio, Desulfotomaculum, Archaeoglobus, Desulfomicrobium, Desulfomonile, Desulfobulbus, Desulfobotulus, Desulfobacula, Thermodesulfobacterium</i>	Remociones arriba del 95% para Al, Cd, Fe, Mn, Ni y Zn	Dvorak et al., 1992
Remoción de sulfatos y metales pesados mediante MSR	<i>Desulfovibrio, Desulfotomaculum, Archaeoglobus, Desulfomicrobium, Desulfomonile, Desulfobulbus, Desulfobotulus, Desulfobacula, Thermodesulfobacterium</i>	“Remoción del 82% de sulfatos y del 97% de Cu, Zn y N”	Jong y Parry, 2003
Remoción biológica de sulfatos y precipitación del zinc	<i>Desulfobacter, Desulfobacterium, Desulfococcus, Desulfonema, Desulfosarcina, Desulfobarculus</i>	Remoción de sulfatos del 89%, para Zn de 62.9% y 92.18% para el Pb	Maree y Strydom, 1987
Uso de un sistema integrado por algas y bacterias sulfato reductoras	<i>Desulfobacter, Desulfobacterium, Desulfococcus, Desulfonema, Desulfosarcina, Desulfobarculus</i>	Remoción de Pb del 99% y de Zn del 90%	Rose et al., 1998
Desarrollo de un proceso de sulfato-reducción para remover metales pesados de un drenaje ácido de mina	<i>Desulfovibrio, Desulfotomaculum, Archaeoglobus, Desulfomicrobium, Desulfomonile, Desulfobulbus, Desulfobotulus, Desulfobacula, Thermodesulfobacterium</i>	Remoción del 99% de Fe, Zn, Cu, Cd, As y Pb en un efluente sintético	Steed et al., 2000
Biotratamientos del drenaje ácido de mina y recuperación de metales	<i>Desulfovibrio, Desulfotomaculum, Archaeoglobus, Desulfomicrobium, Desulfomonile, Desulfobulbus, Desulfobotulus, Desulfobacula, Thermodesulfobacterium</i>	Remociones de Cu del 99.8% y 98% de Zn por medio de precipitación	Tabak et al., 2003

te importantes para la metilación del mercurio y no toleran las condiciones aerobias” (Sánchez-Alarcón, 2005; King et al., 2000). En la Tabla 5 se muestran los MSR encargados de realizar la precipitación de Cu.

Principales especies de microorganismos sulfato reductores (MSR), encargados de realizar la precipitación del Fe

Los microorganismos sulfato reductores involucrados en el proceso de precipitación del hierro que fueron revisados en la literatura crecen en condiciones bastante similares entre sí, siendo la tecnología más utilizada para su uso la del reactor tipo UASB (RALLFA en español). Las condiciones en las que éste trabaja son muy parecidas dentro de la literatura consultada. Generalmente se inyecta al reactor un medio mineral basal cuya composición varía un poco, por ejemplo: Gallegos-García (2009)

utiliza la siguiente composición (g/L): NH₄Cl (0.3), CaCl₂·2H₂O (0.015), KH₂PO₄ (0.2), MgSO₄·7H₂O (0.12), KCl (0.25) y extracto de levadura (0.02). A esto se le añade un lodo granular también llamado lodo anaerobio que en una gran parte de los textos se mantiene en refrigeración a temperaturas de alrededor de 4 o 5°C. Además de este medio varios autores han intentado mejorar la producción de H₂S del proceso al cambiar el material orgánico utilizado por los MSR, como lo hizo Forigua-Quicasán et al. (2017), el cual utilizó ‘compost’ de champiñón teniendo éxito al aumentar la producción de sulfuro y de actividad microbiana siendo que la concentración del sulfato disminuyó en más del 50% en una celda con alto porcentaje de compost (60:40), mientras que en la celda con menor porcentaje de compost (25:75) la concentración de sulfuro incrementó en más del 70%. En la Tabla 6 se muestra la revisión bibliográfica

Tabla 5. MSR responsables de la precipitación del cobre.

Objetivo	MSR	Eficiencia	Referencia
Sistema de intercambio difusivo para el tratamiento de drenajes ácidos con elevadas concentraciones de cobre	<i>Desulfobacter</i> , <i>Desulfobacterium</i> , <i>Desulfonema</i> , <i>Desulfosarcina</i> , <i>Desulfococcus</i> , <i>Desulfarculus</i> , <i>Desulfacinum</i> , <i>Desulforhabdus</i> , <i>Thermodesulforhabdus</i>	“Remoción del 49.4±8.8% de los metales totales del DAM, un 55±9% del Cu, 26±10% del Zn y 41±9% del Al”	Chaparro-Cárcamo, 2016
Biogénesis de sulfuro de hidrógeno empleando ácidos grasos volátiles producidos por la hidrólisis de vegetales y frutas en descomposición	<i>Desulfobacter</i> , <i>Desulfobacterium</i> <i>Desulfonema</i> , <i>Desulfosarcina</i> <i>Desulfococcus</i> , <i>Desulfarculus</i> <i>Desulfacinum</i> , <i>Desulforhabdus</i> <i>Thermodesulforhabdus</i>	Remoción del Zn del 96.75%, Cu del 98.45% y Pb del 100%	Crespo-Melgar, 2009
Estudio de factibilidad del diseño de un sistema biológico-físicoquímico (BFQ) para el tratamiento de drenajes ácidos de mina a escala laboratorio	<i>Desulfobacter</i> , <i>Desulfobacterium</i> , <i>Desulfonema</i> , <i>Desulfosarcina</i> , <i>Desulfococcus</i> , <i>Desulfarculus</i> , <i>Desulfacinum</i> , <i>Desulforhabdus</i> , <i>Thermodesulforhabdus</i>	Remociones de Cu (II) y Zn (II) mayores al 97% y un incremento de pH del drenaje ácido de mina sintético a 8.5	Flor-Cevallos, 2012
Evaluación del funcionamiento de un Sistema Biológico-físicoquímico (BFQ) para el tratamiento	<i>Desulfobacter</i> , <i>Desulfobacterium</i> , <i>Desulfonema</i> , <i>Desulfosarcina</i> , <i>Desulfococcus</i> , <i>Desulfarculus</i> , <i>Desulfacinum</i> , <i>Desulforhabdus</i> , <i>Thermodesulforhabdus</i>	Aumento del pH hasta tener valores de 8.5 en el efluente del sistema y una remoción de Cu (II) mayor al 98% durante 148 días de operación	Gallardo-Lastra, 2011
Efecto del cobre para la remoción de sulfato en un reactor de lecho fijo	<i>Desulfobacter</i> , <i>Desulfobacterium</i> , <i>Desulfonema</i> , <i>Desulfosarcina</i> , <i>Desulfococcus</i> , <i>Desulfarculus</i> , <i>Desulfacinum</i> , <i>Desulforhabdus</i> , <i>Thermodesulforhabdus</i>	Remoción de Cu del 99.59±0.43% y una producción de sulfuro de 39.29 mg S ²⁻ /L*d.	Muñoz et al., 2019
Bioprecipitación de cobre por sulfato-reducción en un reactor anaerobio de lodos granulares expandidos	<i>Desulfobacter</i> , <i>Desulfobacterium</i> , <i>Desulfonema</i> , <i>Desulfosarcina</i> , <i>Desulfococcus</i> , <i>Desulfarculus</i> , <i>Desulfacinum</i> , <i>Desulforhabdus</i> , <i>Thermodesulforhabdus</i>	Remoción de más de 199 mg Cu ²⁺ /L dando un porcentaje de remoción superior al 98%	Valenzuela, 2011

ca sobre los MSR encargados de realizar la precipitación de Fe.

Influencia de los parámetros de operación en la precipitación de metales Pb, Cu, Zn y Fe

Existen distintos parámetros que pueden llegar a influir dentro de la precipitación de metales, empezando por los compuestos donadores de electrones utilizados por las bacterias sulfato reductoras. Algunos ejemplos de estos son: “H₂, lactato, piruvato, fumarato, malato, coli-

na, acetato, propionato, butirato, ácidos grasos de cadena larga, benzoato, indol, hexadecano, etanol y otros alcoholes” (Andrade-Tovar, 2010). Esto es importante debido a que dependiendo del sustrato que se utilice, se obtendrán diferentes productos de bioconversión. Por ejemplo, se ha encontrado que “en las aguas termales minerales en el depósito de Sukhunsk, el organismo *Desulfotomaculum kuznetsovii* formaba como productos de bio-reacción CO₂ y H₂S al ser nutrido con formiato, acetato, propionato, alcoholes varios, sulfato, sulfito,

Tabla 6. MSR responsables de la precipitación del hierro.

Meta	MSR	Eficiencia	Referencia
Evaluación de bacterias sulfato reductoras presentes en reactores pasivos durante la remediación de drenajes ácidos de minas	<i>Desulfobacterium autotrophicum</i> , y tres especies de BSR (<i>Desulfovibrio vulgaris</i> , <i>Desulfomicrobium sp.</i> y <i>Desulfococcus sp.</i>),	Remociones de Fe ²⁺ en los reactores 2 y 4 de 99.7±0.7 y 99.4±1.6%, respectivamente, mientras que para TRH de 1 día, la remoción de Fe ²⁺ fue 86.1±15.9%	Escobar-Restrepo, 2015
Prevención de drenajes ácidos de mina utilizando compost de champiñón como enmienda orgánica	<i>Desulfobacter</i> , <i>Desulfobacterium</i> , <i>Desulfonema</i> , <i>Desulfosarcina</i> , <i>Desulfococcus</i> , <i>Desulfarculus</i> , <i>Desulfacinum</i> , <i>Desulforhabdus</i> , <i>Thermodesulforhabdus</i>	Remociones de Fe ²⁺ > 95%; Mn ²⁺ > 96%; Zn ²⁺ > 52% y de sulfato > 50%	Forigua-Quicasán et al., 2017
Procesos biológicos de sulfatorreducción en biopelículas para la precipitación de metales	<i>Desulfobacter</i> , <i>Desulfobacterium</i> , <i>Desulfonema</i> , <i>Desulfosarcina</i> , <i>Desulfococcus</i> , <i>Desulfarculus</i> , <i>Desulfacinum</i> , <i>Desulforhabdus</i> , <i>Thermodesulforhabdus</i>	“Remociones de Fe, Zn y Cd mayores a 99.0%”	Gallegos-García et al., 2009
Evaluación de los métodos químicos y biogénico para el tratamiento de drenaje ácido de mina a escala de laboratorio	<i>Desulfobacter</i> , <i>Desulfobacterium</i> , <i>Desulfonema</i> , <i>Desulfosarcina</i> , <i>Desulfococcus</i> , <i>Desulfarculus</i> , <i>Desulfacinum</i> , <i>Desulforhabdus</i> , <i>Thermodesulforhabdus</i>	Remociones de Cu del 99.99%, de Fe del 99.99%, de Pb de 96.67%, de Zn del 99.94%, de los sulfatos se consiguió remover el 97.55% y de Ca se removió el 99.96%	Nina-Chambe, 2008
Procesos de bioprecipitación de metales pesados y bio-reducción de hierro (III) para el tratamiento de aguas ácidas de minas a escala de laboratorio	Finalmente, se detectaron géneros sulfato reductores mediante la técnica molecular de hibridación fluorescente in situ (FISH), donde existió predominancia de <i>Desulfovibrio spp.</i> , <i>Desulfobotulus sapovorans</i> y <i>Desulfovibrio fairfieldensis</i> . Seguidos de: <i>Desulfobacter spp.</i> , <i>Desulfobulbus spp.</i> , <i>Desulfosarcina sp.</i> , <i>Desulfonema spp.</i> , <i>Desulfococcus sp.</i> , <i>Desulfobacterium spp.</i> , <i>Desulfobotulus sp.</i> , <i>Desulfostipes sp.</i> , <i>Desulfomusa sp.</i> Y <i>Desulfofrigus</i> y <i>Desulfofaba spp.</i>	Remociones del 70% de sulfatos entre -60-80% de Fe y Zn y, 95-100 % de remoción de cadmio (Cd) y cobre (Cu)	Quiroga-Flores, 2015
Optimización de las condiciones de cultivo de consorcios bacterianos sulfato reductores en la bioprecipitación de Fe (II) del afluyente Antequera, departamento de Oruro, Bolivia	<i>Desulfobacter</i> , <i>Desulfobacterium</i> , <i>Desulfonema</i> , <i>Desulfosarcina</i> , <i>Desulfococcus</i> , <i>Desulfarculus</i> , <i>Desulfacinum</i> , <i>Desulforhabdus</i> , <i>Thermodesulforhabdus</i>	“Remoción de Fe del 95%”	Guardia-Zurita, 2010

tiosulfato” (Lowe et al., 1993). A su vez, la elección del donador de electrones es importante para la eficiencia de la sulfato-reducción. Este parámetro ya ha sido estu-

diado por varios autores. Tal es el caso de Karnachuk et al. (2005), quienes realizaron experimentos al norte de Siberia en los sedimentos de un área minera en los cua-

les utilizaron al acetato como donador de electrones en concentraciones de 7.6 mM (0.5 g DQO/L). Los autores demostraron que las constantes de reducción del sulfato oscilaron entre 0.05 y 30 nmol $\text{SO}_4^{2-}/\text{cm}^3\text{d}$, aumentando la eficiencia. Otro parámetro de gran importancia es el tiempo de residencia o bien el flujo que se tiene en la aplicación de los tratamientos basados en bacterias sulfato-reductoras para equipos que trabajen a flujos continuos. Por ejemplo, en las barreras reactivas permeables se ha encontrado que “si los tiempos de residencia hidráulicos son demasiado cortos no permitirán que los microorganismos produzcan una cantidad suficiente de sulfuro para la precipitación de los metales, ni suficiente alcalinidad para neutralizar la acidez” (Gibert *et al.*, 2002). En diversos estudios se ha demostrado la importancia de este parámetro, tal como lo hicieron Dvorak *et al.* (1992). Los autores demostraron que al duplicar el flujo, se produce una reducción de la concentración de sulfuro generado por la actividad microbiana del 99%. Una buena opción para maximizar las actividades específicas de generación de sulfuro sería simplemente disminuir el flujo o incrementar el grosor del material de soporte de la barrera reactiva permeable. Sin embargo, esto no es posible en las barreras reactivas permeables ya que “el caudal o flujo es fijado por la corriente del yacimiento de agua, mientras que aumentar las dimensiones significaría costos elevados por la cantidad de material requerido” (Gibert *et al.*, 2002). Una opción más viable en tratamientos con tiempos de residencia cortos es la estimulación y aceleración de la actividad bacteriana siendo sugerido por Hammack y Edenborn (1992), donde demostraron que la adición de lactato incrementó la actividad sulfato-reductora, obteniendo así remociones de sulfato del 70% y remociones de níquel del 95%, comparadas con remociones muy bajas sin el uso de lactato. Hablando de otro tipo de proceso como lo es el reactor UASB, diversos autores han realizado investigaciones en cuanto a los parámetros responsables de la eficiencia de dicho procesos, tales como la velocidad de carga orgánica, el tiempo de residencia hidráulico, la temperatura de operación, tipo de inóculo, concentración de DQO y de sólidos suspendidos totales en el influente pues han demostrado ser de vital importancia (Foresti, 1995; Rico *et al.*, 2017; Sánchez *et al.*, 2005; Santana y Oliveira, 2005). Aunque aún no se ha logrado llegar a un acuerdo de condiciones en las cuales se puede llegar a optimizar el proceso pues las condiciones y materiales varían entre cada experimento (Pacco *et al.*, 2018). Para poner un ejemplo de esto, Sánchez *et al.* (2005), trabajaron con un reactor UASB de 5 litros, a temperaturas de entre 30 a 35°C, tiempo de residencia hidráulico de 3 días y una velocidad de carga orgánica promedio de 2.7 kg DQO/d*m³ y fueron capaces de obtener eficiencias de remoción promedio de DQO

total y sólidos suspendidos totales de 56.7% y 52.1%, respectivamente. Al incrementar la velocidad de carga orgánica promedio a 8.1 kg DQO/d*m³ y reducir el tiempo de residencia hidráulico a 1 día se vieron disminuidas a tan solo 18.6 y 27.1%. Caso contrario fue el de Santana y Oliveira (2005), que obtuvieron eficiencias de remoción para dichos parámetros de 80.3 y 72.8%, utilizando un reactor UASB de 908 litros, trabajando con un tiempo de residencia hidráulico de 2.6 días y una velocidad de carga orgánica de 3.4 kg DQO/d*m³ y no vieron afectaciones negativas al reducir el tiempo de residencia hidráulico a 1.3 días y aumentar la velocidad de carga orgánica a 7.43 kg DQO/d*m³, obteniendo al final eficiencias de remoción de DQO total y sólidos suspendidos totales de 87.7 y 81.4%, respectivamente.

CONCLUSIONES

La investigación bibliográfica realizada permitió observar una gran variedad de especies responsables de precipitar Pb, Cu, Zn, Fe. En la mayoría de lo reportado, no se precipita solamente a esos cuatro metales, sino que también traen consigo otra gran variedad de elementos, los cuales están presentes dado el origen del agua de cada investigación. Si bien no todos los artículos revisados tuvieron una relación directa con el efluente proveniente de la operación unitaria de flotación, sí aportaron conocimiento acerca del proceso de sulfato reducción. Además, se recabó información que permite comprender las características de cada especie de MSR. Se alcanzó a visualizar que estos microorganismos son bastante versátiles pues se desarrollan en varios tipos de ambientes y ecosistemas. Incluso, se observó que especies como *Desulfobacter* o *Desulfovibrio* son bastante comunes dadas las condiciones relativamente sencillas que necesitan para desarrollarse. De la misma manera se puede decir que ya se ha demostrado ampliamente que los MSR son altamente eficientes al momento de reducir la acidez del agua, proveniente de la operación unitaria de flotación de una mina, efluentes de cocina, corrientes marinas, etc. También son eficientes para precipitar diferentes elementos pues no requieren de algún agente externo salvo en contadas ocasiones donde la actividad microbiana se veía reducida y era necesario utilizar algún tipo de catalizador. Para ese tipo de casos, ya se tienen igualmente investigaciones donde se debe adicionar nutrientes para incrementar esa actividad. También, gracias a la diversidad de artículos revisados, ya se tiene una idea mucho más clara del proceso y las variables a controlar para poder obtener buenos resultados en cuanto a remoción de metales y, de la misma forma, el gran impacto que esto genera en el ambiente. Es sumamente importante que se sigan desarrollando proyectos de este tipo que tomen un proceso tan común en la

naturaleza como la degradación anaerobia y se pueda llevar a un punto en el cual la tecnología y el ambiente puedan convivir y el ser humano logre obtener un bien de consumo sin causar daños a la naturaleza.

tratamiento de los drenajes ácidos de mina. Tesis de grado para la obtención de Pregrado en Ingeniería Ambiental. Universidad San Francisco de Quito. Quito, Ecuador. <http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/743>.

GLOSARIO

BIDI	Biblioteca Digital de la Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM
'Chancado'	En Centro y Sudamérica significa triturar, machacar o moler, especialmente minerales (vocablo probablemente castellanizado del quechua)
DSpace	<i>Open source repository software package typically used for creating open access repositories for scholarly and/or published digital content</i> / Paquete de software de repositorio de código abierto que normalmente se usa para crear repositorios de acceso abierto para contenidos académico y/o digital publicados
Elsevier	Empresa editorial existente desde que en el occidente se desarrolló la imprenta de Gutenberg
Espiral	Las bacterias en forma de espiral son aquellas que presentan más de una curvatura y nunca son rectas (Pedrique-de-Aulacio et al., 2008)
Google Académico	Repositorio de publicaciones en inglés y español
IPICT Reppositorio	Repositorio del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, San Luis Potosí, México
MSR	Microorganismos sulfato-reductores
RALLFA	Reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente
Redalyc	Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
SciELO	<i>Scientific Electronic Library Online</i> o Biblioteca Científica Electrónica en Línea
Science Direct	Repositorio de publicaciones en inglés
SEDICI	Servicio de Difusión de la Creación Intelectual
Tétradas	Son agrupaciones de cuatro cocos en una disposición cuadrada. Se dividen en dos direcciones perpendiculares (Pedrique-de-Aulacio et al., 2008)
UDES Reppositorio	Repositorio digital de la Universidad de Santander, España

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo brindado por el Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica, PAPIIT, clave IN110022, Desarrollo de un modelo cinético diferencial para un reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA) utilizado para el tratamiento de un efluente proveniente del proceso unitario de flotación, de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la Universidad Nacional Autónoma de México, a cargo del Prof. Dr. Ángel Enrique Chávez-Castellanos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andrade-Tovar, V.S. (2010). Evaluación del potencial de generación de sulfuro por la acción de las bacterias sulfato reductoras y sus posibles aplicaciones en el

Basilio-Tavera, J.C. (2015). Influencia de la acidez en la remoción de plomo (Pb^{2+}) utilizando dolomita como adsorbente. Tesis para optar el título de Ingeniero Ambiental. Universidad Nacional Agraria de La Selva, Facultad de Recursos Naturales Renovables. 89 pp. Tingo María, Perú. <http://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/1704>.

Bayoumy, M.E., Bewtra, J.K., Ali, H.I., Biswas, N. (1999). Removal of heavy metals and COD by SRB in UAFF reactor. *Journal of Environmental Engineering*. 125 (6):532-539.

Castro, H.F., Williams, N.H., Ogram, A. (2000). Phylogeny of sulfate-reducing bacteria. *FEMS Microbiology Ecology*. 31(1):1-9.

Castro-Chamorro, J.A. (2005). Optimización del proceso de flotación de concentrado de zinc en la Compañía

- Minera "Yauliyacu" SA mediante diseños experimentales. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minería, Metalúrgica y Geografía E.A.P. de Ingeniería Metalúrgica. 77 pp. Lima, Perú. <http://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/20.500.12672/2638>.
- Cedillo-Salazar, E., Carrillo-Pedroza, F., Berumen, C., Benavides, R., Almaguer-Guzmán, I. (2017). Lixiviación directa de concentrados de galena en ácido clorhídrico y cloruro de sodio con aplicación de ozono como agente oxidante. En Memorias del Congreso Internacional de Metalurgia y Materiales, 38 CIMM. Pp. 301-309. Saltillo, Coahuila, México. <https://www.its.mx/memorias/38CIMM.pdf>.
- Chaparro-Cárcamo, G.O. (2016). Sistema de intercambio difusivo para el tratamiento de drenajes ácidos con elevadas concentraciones de cobre. Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería con mención en Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción. 83 pp. Concepción, Chile. <http://repositorio.udec.cl/handle/11594/2096>.
- Chávez-Lizárraga, G.A., Álvarez-Aliaga, M.T.T., Giménez-Turba, A.T. (2006). Precipitación de metales pesados con sulfuro de hidrógeno biogénico producido a partir de la degradación 'anaeróbica' de material celulósico y xilanósico. Disertación Doctoral. Universidad Mayor de San Andrés, Maestría en Ciencias Biológicas y Biomédicas, Instituto de investigaciones Fármaco Bioquímicas. 109 pp. La Paz, Bolivia. <https://repositorio.umsa.bo/xmlui/handle/123456789/18098>.
- Coll-Hurtado, A., Salazar, M.T.S., Morales, J. (2002). La minería en México. UNAM. 126 pp. Ciudad de México, México. <http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/view/82/83/252-1>.
- Crespo-Melgar, C.F. (2009). Biogénesis de sulfuro de hidrógeno empleando ácidos grasos volátiles producidos por la hidrólisis de vegetales y frutas en descomposición. Tesina elaborada para optar por el grado de Licenciatura en Bioquímica. Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Ciencias Farmacéuticas y Bioquímica, Instituto de Investigaciones Fármaco-Bioquímicas. 188 pp. La Paz, Bolivia. <https://repositorio.umsa.bo/handle/123456789/472>.
- Deplancke, B., Hristova, K.R., Oakley, H.A., McCracken, V.J., Aminov, R., Mackie, R.I., Gaskins, H.R. (2000). Molecular ecological analysis of the succession and diversity of sulfate-reducing bacteria in the mouse gastrointestinal tract. *Applied and Environmental Microbiology*. 66(5):2166-2174.
- Di-Maria, F. (2017). The recovery of energy and materials from food waste by codigestion with sludge: Internal environment of digester and methanogenic pathway. In Food Bioconversion Pp. 95-125. Alexandru Mihai Grumezescu, Alina Maria Holban, Eds. Academic Press. Nueva York, Estados Unidos. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128114131000036>.
- DOF. (2009). DIARIO OFICIAL (Primera Sección). Modificación del inciso 0, el encabezado de la Tabla 13, el último párrafo del Anexo B y el apartado Signo decimal de la Tabla 21 de la Norma Oficial Mexicana NOM-008-SCFI-2002, Sistema general de unidades de medida. CUARTO.- Se modifica el encabezado de la Tabla 13 para quedar como sigue: Tabla 21 - Reglas para la escritura de los números y su signo decimal. Signo decimal El signo decimal debe ser una coma sobre la línea (,) o un punto sobre la línea (.). Si la magnitud de un número es menor que la unidad, el signo decimal debe ser precedido por un cero. Diario Oficial de la Federación: Jueves 24 de septiembre de 2009. Poder Ejecutivo Federal. México D.F., México.
- Durán-Barrantes, M.D.L.M., Jiménez-Rodríguez, A.M., Martel-Villagrán, F.J. (2000). Tratamiento biológico de aguas ácidas de minería: Selección de una población bacteriana enriquecida en bacterias sulfatorreductoras. *Tecnología del Agua*. 203:56-60.
- Dvorak, D.H., Hedin, R.S., Edenborn, H.M., McIntire, P.E. (1992). Treatment of metal-contaminated water using bacterial sulfate reduction: Results from pilot-scale reactors. *Biotechnology and Bioengineering*. 40(5):609-616.
- EMDP. (2000). Manual de Minería. Estudios Mineros del Perú, S.A.C. http://www.iestpoyon.edu.pe/web/documentos/Manual_de_Mineria.pdf.
- Escobar-Restrepo, M.C. (2015). Evaluación de bacterias sulfato reductoras presentes en reactores pasivos durante la remediación de drenajes ácidos de minas. Tesis para optar por el título de Magister en Ciencias Biológicas. Facultad de Ciencias, Pontificia Universidad Javeriana. 115 pp. Bogotá, D.C., Colombia. <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/20631>.
- Flor-Cevallos, D.E. (2012). Estudio de factibilidad del diseño de un sistema biológico-físico-químico (BFQ) para el tratamiento de drenajes ácidos de mina a esca-

- la laboratorio. Tesis de grado para la obtención de pregrado en Ingeniería Ambiental. Universidad San Francisco de Quito. 102 pp. Quito, Ecuador. <https://repositorio.usfq.edu.ec/jspui/handle/23000/1875>.
- Flores, M.E., Idrovo, M.M., Flores, D.V. (2016). Evaluación de la extracción de plomo y cadmio de vajilla cerámica vidriada. *Maskana*. 7(1):97-106.
- Foresti, E. (1995). Anaerobic treatment of piggery wastewater in UASB reactors. In Proceedings 7th International Symposium on Agricultural and Food Processing Wastes. June, 18-20, pp. 309-318. Chicago, Estados Unidos.
- Forigua-Quicasán, D., Fonseca Forero, N., Vásquez, Y. (2017). Acid mine drainage prevention using mushroom compost as organic amendment. *Revista Colombiana de Biotecnología*. 19(1):92-100.
- Gallardo-Lastra, L.F. (2011). Evaluación del funcionamiento de un sistema biológico-físico-químico (BFQ) para el tratamiento. Tesis de grado para la obtención de Pregrado en Ingeniería Ambiental. Universidad San Francisco de Quito. 97 pp. Quito, Ecuador. <https://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/1235>.
- Gallegos-García, M. (2009). Procesos biológicos de sulfatorreducción en biopelículas para la precipitación de metales. Tesis presentada para obtener el grado de Doctor en Ciencias Aplicadas en la opción de Ciencias Ambientales. División de Ciencias Ambientales del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A.C. 120 pp. San Luis Potosí, S.L.P. México. <https://repositorio.ipicyt.edu.mx/handle/11627/85>.
- Gallegos-García, M., Celis, L.B., Rangel-Méndez, R., Razo-Flores, E. (2009). Precipitation and recovery of metal sulfides from metal containing acidic wastewater in a sulfidogenic down-flow fluidized bed reactor. *Biotechnology and Bioengineering*. 102(1):91-99.
- Gamarra-Maldonado, H.E. (2019). Flotación 'bulk' de minerales sulfurados de plomo-zinc refractarios de bajo grado en la Planta Concentradora de Huari de la UNCP. Tesis de Ingeniero Metalurgista y de Materiales. Universidad Nacional del Centro del Perú, Facultad de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales. 79 pp. Perú. <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/6490>.
- Gibert, O., De Pablo, J., Cortina, J.L., Ayora, C. (2002). Treatment of acid mine drainage by sulphate-reducing bacteria using permeable reactive barriers: A review from laboratory to full-scale experiments. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*. 1(4), 327-333.
- Guevara-González, B.X. (2016). La inversión extranjera directa en la minería en México: El caso del oro. *Análisis económico*. 31(77):85-113.
- Guardia-Zurita, D. (2010). Optimización de las condiciones de cultivo de consorcios bacterianos sulfato-reductores en la bioprecipitación de Fe (II) del efluente Antequera, Departamento de Oruro, Bolivia. Tesis para acceder al grado de licenciatura. Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Ciencias Farmacéuticas y Bioquímica, Instituto de Investigaciones Fármaco-Bioquímicas. 49 pp. La Paz, Bolivia. <https://repositorio.umsa.bo/handle/123456789/19427>.
- Guzmán-López, F. (2016). Impactos ambientales causados por megaproyectos de minería a cielo abierto en el estado de Zacatecas, México. 10.5154/r. rga. 2016.57. 010.
- Hamilton, T., Huai, Y., Peng, Y. (2020). Lead adsorption on copper sulphides and the relevance to its contamination in copper concentrates. *Minerals Engineering*. 154:106381.
- Hammack, R.W., Edenborn, H.M. (1992). The removal of nickel from mine waters using bacterial sulfate reduction. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 37 (5):674-678.
- Hrùzová, K., Matsakas, L., Sand, A., Rova, U., Christakopoulos, P. (2020). Organosolv lignin hydrophobic micro- and nanoparticles as a low-carbon footprint biodegradable flotation collector in mineral flotation. *Bioresource Technology*. 306:123235.
- Hurtado, J., Berastain, A. (2012). Optimización de la biorremediación en relaves de cianuración adicionando nutrientes y microorganismos. *Revista Peruana de Biología*. 19(2):187-192.
- Jong, T., Parry, D.L. (2003). Removal of sulfate and heavy metals by sulfate reducing bacteria in short-term bench scale upflow anaerobic packed bed reactor runs. *Water Research*. 37(14):3379-3389.
- Karnachuk, O.V., Pimenov, N.V., Yusupov, S.K., Frank, Y.A., Frank, Y.A., Kaksonen, A.H., Tuovinen, O.H. (2005). Sulfate reduction potential in sediments in the Norilsk mining area, northern Siberia. *Geomicrobiology Journal*. 22(1-2):11-25.
- King, J.K., Kostka, J.E., Frischer, M.E., Saunders, F.M. (2000). Sulfate-reducing bacteria methylate mercury at variable

- rates in pure culture and in marine sediments. *Applied and Environmental Microbiology*. 66(6):2430-2437.
- Kuever, J., Rainey, F. A., Widdel, F. (2015). Syntrophobacteraceae fam. nov. En *Bergey's Manual of Systematics of Archaea and Bacteria*, Online© 2015 Bergey's Manual Trust. This article is © 2005 Bergey's Manual Trust. DOI: 10.1002/9781118960608.gbm01035. Published by John Wiley & Sons, Inc., in association with Bergey's Manual Trust. Nueva York, Estados Unidos.
- Laanbroek, H.J., Geerligs, H.J., Sijtsma, L., Veldkamp, H. (1984). Competition for sulfate and ethanol among *Desulfobacter*, *Desulfobulbus*, and *Desulfovibrio* species isolated from intertidal sediments. *Applied and Environmental Microbiology*. 47(2):329-334.
- León-Arroyo, F.J., Dianderas-Mandujano, J.D. (2019). Efecto del porcentaje de sólidos en la flotación de la galena a partir de un mineral de bajo grado de plomo-zinc en la Compañía Minera Casapalca SA. Tesis de Ingeniería Metalurgista y de Materiales. Universidad Nacional del Centro del Perú, Facultad de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales. 81 pp. Perú. <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/6012>.
- Londry, K.L., Fedorak, P.M., Sufliya, J.M. (1997). Anaerobic degradation of m-cresol by a sulfate-reducing bacterium. *Applied and Environmental Microbiology*. 63(8):3170-3175.
- Lorenzo-Tallafigo, J., Romero-García, A., Iglesias-González, N., Mazuelos, A., Romero, R., Carranza, F. (2021). A novel hydrometallurgical treatment for the recovery of copper, zinc, lead, and silver from bulk concentrates. *Hydrometallurgy*. 200:105548.
- Loreto-Muñoz, C.D., Certucha-Barragán, M.T., Almendáriz-Tapia, F.J., Ochoa-Herrera, V., Monge-Amaya, O. (2019). Efecto del cobre para la remoción de sulfato en un reactor de lecho fijo. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 35:37-44.
- Lowe, S.E., Jain, M.K., Zeikus, J.G. (1993). Biology, ecology, and biotechnological applications of anaerobic bacteria adapted to environmental stresses in temperature, pH, salinity, or substrates. *Microbiological Reviews*. 57(2):451-509.
- Maree, J.P., Strydom, W.F. (1987). Biological sulphate removal from industrial effluent in an upflow packed bed reactor. *Water Research*. 21(2):141-146.
- Monroy-Cruz, Y.Y. (2014). Bacterias sulfato reductoras. Especialización en Planeación Ambiental y Manejo Integral de los Recursos Naturales. Universidad Militar Nueva Granada, 28 pp. Bogotá, Colombia. <https://repositorio.unimilitar.edu.co/handle/10654/12039>.
- Nina-Chambe, M. (2008). Evaluación de los métodos químico y biogénico para el tratamiento de drenaje ácido de mina a escala de laboratorio. Caso: Mina Cerro de Pasco. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. 105 pp. Lima, Perú. <http://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/20.500.12672/802>.
- Pacco, A., Vela, R., Miglio, R., Quipuzco, L., Juscamaita, J., Álvarez, C., Fernández-Polanco, F. (2018). Propuesta de parámetros de diseño de un reactor UASB para el tratamiento de aguas residuales porcinas. *Scientia Agropecuaria*. 9(3):381-391.
- Palomino-Cadenas, E.J. (2007). Sistemas de humedales para la biorremediación de drenajes ácidos de mina o roca en Ancash-Perú. Tesis para optar el grado de Doctor en Ciencias Ambientales. Universidad Nacional de Trujillo, Escuela de Postgrado, Programa Doctoral en Ciencias Ambientales. 97 pp. Trujillo, Perú. <https://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/5359>.
- Pedrique-de-Aulacio, M., De-Castro, N. (2001). Garcés, A., Saravia, K. Actualización 2008. Guía de Teoría. Cátedra de Microbiología. Facultad de Farmacia, Universidad Central de Venezuela. http://www.ucv.ve/fileadmin/user_upload/facultad_farmacia/catedraMicro/08_Tema_2_morfologia.pdf.
- Quiroga-Flores, R. (2015). Procesos de bioprecipitación de metales pesados y bioreducción de hierro (III) para el tratamiento de aguas ácidas de minas a escala laboratorio. Disertación Doctoral. Alvarez-Aliaga, M.T. Tutora. Universidad Mayor de San Andrés. La Paz, Bolivia. <https://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/17429/TM-1895.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Rico, C., Montes, J.A., Rico, J.L. (2017). Evaluation of different types of anaerobic seed sludge for the high-rate anaerobic digestion of pig slurry in UASB reactors. *Bioresource Technology*. 238:147-156.
- Rose, P.D., Bischoff, G.A., Van Hille, R.P., Wallace, L.C.M., Dunn, K.M., Duncan, J.R. (1998). An integrated algal sulphate reducing high-rate ponding process for the treatment of acid mine drainage wastewaters. *Biodegradation*. 9(3):247-257.
- Sánchez-Alarcón, S.R. (2005). Distribución de bacterias sulfato reductoras y metilmercurio en sedimentos de lagunas de inundación del río Beni, Amazonía boliviana.

- na. Tesis para optar el grado de Magister en Ciencias biológicas y biomédicas, La Paz, Bolivia.
- Sánchez, E., Borja, R., Travieso, L., Martín, A., Colmenarejo, M.F. (2005). Effect of organic loading rate on the stability, operational parameters and performance of a secondary upflow anaerobic sludge bed reactor treating piggery waste. *Bioresource Technology*. 96(3):335-344.
- Santana, M.A., Oliveira, R.A., (2005). Desempenho de reatores anaeróbios de fluxo ascendente com manta de lodo em dois estágios tratando águas residuárias de suinocultura. *Engenharia Agrícola*. 25(3):817-830.
- Steed, V.S., Suidan, M.T., Gupta, M., Miyahara, T., Acheson, C.M., Sayles, G.D. (2000). Development of a sulfate-reducing biological process to remove heavy metals from acid mine drainage. *Water Environment Research*. 72(5):530-535.
- Tabak, H.H., Scharp, R., Burckle, J., Kawahara, F.K., Govind, R. (2003). Advances in biotreatment of acid mine drainage and biorecovery of metals: 1. Metal precipitation for recovery and recycle. *Biodegradation*. 14 (6):423-436.
- Valderrama, L., González, M., Santander, M., Zazzali, B. (2018). Recuperación de cobre contenido en escoria de cobre mediante flotación. *HOLOS*. 5:40-50.
- Valenzuela, R.A. (2011). Bioprecipitación de cobre por sulfato-reducción en un reactor anaerobio de lodos granulares expandidos. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería. Posgrado en Ciencias de la Ingeniería, División de Ingeniería, Universidad de Sonora. 116 pp. Hermosillo, Sonora, México. <http://www.repositorioinstitucional.uson.mx/handle/unison/318?locale=es>.
- Van der Maarel, M.J., Jansen, M., Haanstra, R., Meijer, W.G., Hansen, T.A. (1996). Demethylation of dimethylsulfoniopropionate to 3-S-methylmercaptopropionate by marine sulfate-reducing bacteria. *Applied and Environmental Microbiology*, 62(11), 3978-3984. <https://journals.asm.org/doi/epdf/10.1128/aem.62.11.3978-3984.1996>.
- Velasco, J.A., de la Rosa, A., Volke-Sepúlveda, T. (2005). Precipitación de altas concentraciones de plomo por bacterias sulfato-reductoras en un reactor a régimen continuo. En XI Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería. México. https://smbb.mx/congresos%20smbb/merida05/TRABAJOS/AREA_IV/OIV-01.pdf.
- Velasco, J.A., Revah, S. (2007). Evaluación de la relación COD/sulfato para maximizar la formación biológica de sulfuro y precipitar metales pesados. XII Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería. https://smbb.mx/congresos%20smbb/morelia07/TRABAJOS/Area_IV/CARTELES/CIV-69.pdf.
- Wise, R.D., Mendoza, R.D.P. (2001). Minería, Estado y gran capital en México. *Economía e Sociedade*. 10 (1):105-127.
- Zanin, M., Lambert, H., du Plessis, C.A. (2019). Lime use and functionality in sulphide mineral flotation: A review. *Minerals Engineering*. 143:105922.
- Zhang, Q., Feng, Q., Wen, S., Cui, C., Liu, J. (2019). A novel technology for separating copper, lead and zinc in flotation concentrate by oxidizing roasting and leaching. *Processes*. 7(6):376-389.