

99

Série Estudos e Documentos

A biohidrometalurgia e os minerais críticos

Ellen Cristine Giese

CETEM
CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL



SÉRIE ESTUDOS E DOCUMENTOS

A biohidrometalurgia e os minerais críticos

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA

Jair Messias Bolsonaro

Presidente

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES

Marcos Cesar Pontes

Ministro de Estado da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações

Julio Francisco Semeghini Neto

Secretário Executivo

Gerson Nogueira Machado de Oliveira

Subsecretário de Unidades Vinculadas

Cesar Augusto Rodrigues do Carmo

Coordenador-Geral de Unidades de Pesquisa

CETEM – CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL

Fernando Antonio Freitas Lins

Diretor

Gustavo Silva Menezes

Coordenador de Administração - COADM

Robson de Araújo D'Ávila

Coordenador de Planejamento, Gestão e Inovação - COPGI

Claudio Luiz Schneider

Coordenador de Processamento e Tecnologias Minerais - COPTM

Andréa Camardella de Lima Rizzo

Coordenadora de Processos Metalúrgicos e Ambientais - COPMA

Francisco Wilson Hollanda Vidal

Coordenador do Núcleo Regional do Espírito Santo - CONES

José Antônio Pires de Mello

Coordenador de Análises Minerais - COAMI

SÉRIE ESTUDOS E DOCUMENTOS

ISSN 0103-6319

ISBN 978-85-8261-109-8

SED - 99

A biohidrometalurgia e os minerais críticos

Ellen Cristine Giese

Química, D.Sc. em Engenharia e Ciência de Alimentos pela
Universidade Estadual Paulista, São José do Rio Preto, SP
Tecnologista Pleno do CETEM/MCTIC

CETEM/MCTIC

2019

SÉRIE ESTUDOS E DOCUMENTOS

Carlos Cesar Peiter

Editor

Ana Maria Botelho M. da Cunha

Subeditora

CONSELHO EDITORIAL

Francisco Rego C. Fernandes (CETEM), Gilson Ezequiel Ferreira (CETEM), Alfredo Ruy Barbosa (consultor), Gilberto Dias Calaes (ConDet), José Mário Coelho (CPRM), Rupen Adamian (UFRJ).

A Série Estudos e Documentos publica trabalhos que busquem divulgar estudos econômicos, sociais, jurídicos e de gestão e planejamento em C&T, envolvendo aspectos tecnológicos e/ou científicos relacionados à área minerometalúrgica.

O conteúdo desse trabalho é de responsabilidade exclusiva do(s) autor(es).

Valéria Cristina de Souza

Coordenação Editorial

Editoração Eletrônica

Ellen Cristine Giese

Revisão

Ana Maria Silva Vieira de Sá

CRB7 3982

Catálogo na Fonte

Giese, Ellen Cristine

A biohidrometalurgia e os minerais críticos / Ellen Cristine Giese. — Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2019.

29p.:il. (Série Estudos e Documentos, 99)

1. Biohidrometalurgia. 2. Metais do grupo da platina.
3. Elementos terras-raras. I. Centro de Tecnologia Mineral. II. Título.
III. Série.

CDD – 669.0283

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	8
1 INTRODUÇÃO	9
2 INTERAÇÃO ENTRE OS MICRO-ORGANISMOS E OS SUBSTRATOS MINERAIS	11
3 BIOMINERAÇÃO DE MINERAIS CRÍTICOS: SONHO OU REALIDADE?	12
4 EFLUENTES LÍQUIDOS: POSSÍVEIS FONTES DE MINERAIS ESTRATÉGICOS?	17
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	20
6 AGRADECIMENTOS	21
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	22

RESUMO

Os desafios para suprir a demanda por metais do grupo da platina (MGPs) e elementos de terras raras (ETRs) têm gerado grandes esforços políticos e industriais diante das ofertas destes minerais considerados críticos. Um dos desafios a ser discutido é o uso de abordagens ambientalmente sustentáveis para a recuperação destes metais a partir de fontes primárias e secundárias. Nesta revisão, buscamos definir as fontes e os tipos de resíduos a partir dos quais os MGPs e ETRs podem ser recuperados por via biohidrometalúrgica, de forma sustentável com o uso de micro-organismos; assim como também discutimos as interações metal-micróbios visando o desenvolvimento de bioprocessos a integrarem o setor minerometalúrgico. Finalmente, destacamos os desafios da biohidrometalurgia para o setor de minerais críticos, dadas as complexidades físicas e químicas das fontes primárias e secundárias destes minerais.

Palavras-chave

Biohidrometalurgia; metais do grupo da platina; elementos terras-raras; micro-organismos.

ABSTRACT

The growing demand for green technologies for low carbon consumption requires increasing use of platinum group metals (PGMs) and rare earth elements (REEs). The geopolitical challenges to supply the demand for these metals have generated major governmental and industrial efforts to deal with supply risks and uncertainties. As a result of the growing critical importance of PGMs and REEs, it was necessary to begin a discussion of environmentally sustainable approaches to the recovery of these metals from primary and secondary ores. In this review, we sought to define the sources and the waste streams from which the PGMs and REEs can be recovered in a sustainable way using microorganisms and discuss the metal-microbe interactions aiming the development of bioprocesses to integrate in the mining and metallurgical sector. Finally, we highlight the challenges of effectively applying biotechnological processes for the recovery of metals, given the physical and chemical complexities of specific flows.

Keywords

Biohydrometallurgy; platinum group metals; rare earth elements; microorganisms.

1 | INTRODUÇÃO

A biohidrometalurgia é o termo usado para descrever os processos biotecnológicos que envolvem as interações entre os micro-organismos e metais, ou entre os micro-organismos e minerais contendo metais (HENNEBEL et al., 2015). Dentre os processos comumente empregados na recuperação de espécies metálicas a partir de diferentes tipos de resíduos, destacam-se os processos de biolixiviação e biorremediação (GU et al., 2018). A biolixiviação é um processo comumente utilizado para a extração e a recuperação de metais a partir de minérios e resíduos (GIESE, 2017a), enquanto a biorremediação busca a remoção e/ou imobilização de contaminantes perigosos como radionuclídeos e metais pesados depositados em locais contaminados (GADD, 2000).

As demandas crescentes por minerais estratégicos têm impulsionado a mineração urbana, ampliando o desenvolvimento de novas rotas tecnológicas baseadas na biometalurgia para extrair, separar, purificar e recuperar metais críticos (GIESE, 2017a; XAVIER; LINS, 2018; GIESE; XAVIER; LINS, 2018).

A biomineração urbana, ou seja, a recuperação de elementos metálicos a partir de tipos de resíduos sólidos através do uso de micro-organismos (GIESE; XAVIER; LINS, 2018), tem sido especialmente considerada para o caso da recuperação de elementos cujo suprimento tem sido considerado crítico, como é o caso dos metais do grupo da platina (MGPs); platina (Pt), paládio (Pd), ródio (Rd), rutênio (Rh), irídio (Ir) e ósmio (Os); e dos elementos de terras raras (ETRs); os 15 elementos ao

grupo dos lantanídeos (do lantânio (La) ao lutécio (Lu)), aos quais se juntam o escândio (Sc) e o ítrio (Y). A demanda por tecnologias emergentes poupadoras de energia aliada às políticas econômicas de baixo carbono tornam estes elementos de grande importância econômica e estratégica.

2 | INTERAÇÃO ENTRE OS MICRO-ORGANISMOS E OS SUBSTRATOS MINERAIS

A adesão microbiana sobre superfícies sólidas é a maneira mais comum de os micro-organismos estarem presentes na natureza, especialmente sobre rochas e minerais, e está diretamente relacionada à atividade microbiana e sua sobrevivência. A interação micro-organismo/superfície mineral é principalmente regulada pela formação de biofilmes, fator imprescindível aos processos biohidrometalúrgicos (GIESE, 2014).

Os micro-organismos interagem com os substratos minerais e acabam absorvendo ou adsorvendo uma grande variedade de MGPs, ETRs e metais pesados, incluindo Pt, Fe, Ni, Cu, Zn, Pb, Cu, Pd, Ag, Cd, Pt, Au e Hg; com capacidades de ligação tipicamente ordem de 10^{-5} a 10^{-3} mol de metal/g de células. A adsorção de metais pela biomassa microbiana segue modelos termodinâmicos, onde a constante de equilíbrio de um metal adsorvido à superfície microbiana é associada às interações entre as espécies metálicas e os grupos carboxila, fosforila e hidroxila ligados à superfície celular (FEIN et al., 2005).

No caso dos MGPs, podem ocorrer ainda reações de precipitação (HENNEBEL et al., 2012) e redução, sendo estas últimas catalisadas pela atividade de citocromos e hidrogenases presentes nas células microbianas (NG et al., 2013a,b). As reações de redução já não ocorrem nos processos de adsorção de ETRs, pois o estado de oxidação destes elementos permanece inalterado em condições ambientais e a redução destes elementos é termodinamicamente desfavorável.

3 | BIOMINERAÇÃO DE MINERAIS CRÍTICOS: SONHO OU REALIDADE?

A biomineração de minérios primários tem sido principalmente utilizada na extração de cobre, níquel e ouro; através de técnicas de biolixiviação em pilhas ou bio-oxidação em biorreatores de tanques agitados (GIESE, 2017a; POTYSZ; VAN HULLEBUSCH; KIERCZAK, 2018). Nestes casos, os processos microbianos são baseados na utilização autotrófica de minerais sulfurados e ferrosos com biogeração de metabólitos oxidantes e lixivantes (EHRlich, 1997).

Porém, a aplicação de técnicas convencionais de biolixiviação para MGPs e ETRs, no entanto, precisa superar uma série de desafios relacionados aos seus materiais de origem.

Os ETRs são tipicamente minerados como carbonatos (bastnasita) ou fosfatos (monazita e xenotima) a partir de rochas ígneas e alcalinas, ou como íons absorvidos em minerais argilosos (argilas de adsorção iônica) (SOUZA; NASCIMENTO; GIESE, *in press*).

Atualmente, a DNI Metals (Alberta, Canadá) opera um projeto de lixiviação de ETRs com o uso de bio-pilhas. Este processo é possível devido ao alto teor de sulfetos polimetálicos nos depósitos de xisto de Buckton, compostos por Ni, Co, Zn, Cu, U e ETRs, o que permite a recuperação de quantidades economicamente viáveis de escândio, o qual ocorre em uma "zona metalizada" do xisto em uma concentração de aproximadamente ~5 g Sc/ton (CISION, 2013).

Os MGPs são geralmente extraídos de depósitos de Ni ou Cu com concentrações de Pt, Pd e Rh em torno de 1 a 10 g/ton (PINA et al., 2012). A maioria destes depósitos é constituída por minerais contendo sulfeto e, desta maneira, Ni e Cu são

recuperados satisfatoriamente por meio de biolixiviação em pilhas. Os sulfetos de MGP, no entanto, são mais estáveis do que os sulfuretos de metais básicos e, portanto, são mais difíceis de sofrer oxidação (YOPPS; BAGLIN, 1991).

Os ETRs e MGPs também podem ser extraídos a partir de diferentes fontes de resíduos sólidos. De modo geral, os minerais críticos podem ser encontrados em: (1) sucata/resíduos de fabricação pré-consumo; (2) reciclagem de produtos pós-consumo; e (3) mineração de aterros de resíduos urbanos e industriais (BINNEMANS et al., 2013).

Os dois primeiros apresentam os maiores níveis de ETRs e MGPs. Ímãs permanentes, baterias híbridas níquel-metálicas, fósforos de lâmpadas, catalisadores de carros usados e resíduos eletro-eletrônicos são as fontes mais utilizadas dentro dos dois primeiros tipos de resíduos devido ao seu alto teor de metais e consistências físicas dentro de cada categoria.

Técnicas pirometalúrgicas e hidrometalúrgicas têm sido usadas para a recuperação de metais a partir desses resíduos. E assim, uma vez que estas operações unitárias convencionais apresentam eficiência, as técnicas biometalúrgicas parecem ter pouca utilidade. Por outro lado, embora os resíduos residuais urbanos e industriais contenham concentrações de metais críticos muito menores, seus volumes podem ser enormes. Os exemplos incluem, mas não estão limitados a, resíduos de minas de bauxita, fosfogesso, cinzas de incineradores, escórias de metalurgia, drenagem ácida de minas e águas residuais industriais e municipais. Desta maneira, práticas mais sustentáveis devem ser consideradas futuramente para a recuperação de minerais extratégicos através da biomineração urbana (GIESE: XAVIER: LINS, 2018).

O maior desafio relacionado à recuperação de metais estratégicos a partir de resíduos sólidos é o desenvolvimento de uma tecnologia efetiva para a liberação e separação seletiva destes elementos a partir de fontes secundárias. Dentre as técnicas biohidrometalúrgicas utilizadas atualmente destacam-se a biolixiviação autotrófica e a lixiviação heterotrófica direta e a indireta, técnicas estas que vêm sendo utilizadas em conjunto com processos de recuperação baseados na bioissorção.

Até o presente momento, o uso de micro-organismos heterotróficos não foi demonstrado em processos industriais. Este grupo de micro-organismos, que incluem leveduras, fungos e bactérias, tem sido amplamente descrito pela produção de moléculas quelantes e ácidos orgânicos, como os ácidos cítrico, oxálico e glucônico; compostos estes que também podem atuar na solubilização de metais (GADD, 1999; BRANDL, 2008; DENG et al., 2013).

A maior dificuldade em se trabalhar com micro-organismos heterotróficos está na necessidade contínua da adição de quantidades significativas de fontes energéticas de carbono e nutrientes, as quais viabilizam o crescimento microbiano e a atividade metabólica durante o processo de lixiviação. Este fator nutricional apresenta grande contraste com a lixiviação autotrófica, a qual requer apenas pequenas quantidades de alguns nutrientes inorgânicos.

Porém, acredita-se que, embora ocorram limitações no uso da biolixiviação heterotrófica para MGPs e ETRs, o alto valor do produto final poderia vir a justificar o custo adicional desta operação. Esta ideia foi parcialmente demonstrada pela tecnologia BioHeap™ da Western Areas Ltd. que utiliza

culturas exógenas aclimatadas a ambientes hipersalinos e de alta temperatura para conduzir processos de biolixiviação mais eficazes (WATLING, 2015).

Dentre os ácidos orgânicos produzidos pelos micro-organismos heterotróficos, o ácido cítrico parece ter o maior potencial para aplicação na biometalurgia devido à sua eficiência comprovada na extração de metais pesados de várias fontes, incluindo cinzas volantes geradas pela incineração de resíduos municipais, sucata eletrônica e lodo ativado (BOSSHARD; BACHOFEN; BRANDL, 1996; KREBS et al., 1997; DENG et al., 2013). Este ácido orgânico é amplamente produzido por via fermentativa e contém três grupos carboxílicos e um grupo hidroxila capazes de formar quelatos estáveis com ETRs trivalentes (WU et al., 1995)

A recuperação de ETRs com o uso de ácido cítrico gerado biologicamente foi recentemente demonstrada usando lama vermelha e resíduos de bauxita, um subproduto nocivo do processo Bayer para extração de alumínio do minério de bauxita (QU; LIAN, 2013; RITTER, 2014). O fungo filamentosso *Penicillium tricolor* foi utilizado para a produção de ácido cítrico e ácido oxálico na presença de glicose como fonte de carbono e energia. Os autores observaram que a produção contínua de ácido durante o processo de biolixiviação heterotrófica compensou o aumento do pH do meio reacional causado pelo consumo de prótons pelos óxidos de ferro na lama vermelha; assim, o ácido produzido durante o processo colaborou na manutenção de valores de pH baixos facilitando a extração de ETRs.

A biossorção é uma técnica baseada na adsorção de metais em biomassas ativas ou inativas através da interação das espécies iônicas com sítios ativos livres presentes na parede celular de biomassas de origem microbiana ou vegetal (GIESE; MAGALHÃES; EGLER, 2016). Este processo tem sido utilizado com sucesso para a recuperação do MGP a partir de produtos em fim de vida. Por exemplo, MACASKIE et al. (2007) obtiveram licores ácidos a partir da hidrólise de catalisadores automotivos esgotados triturados em partículas finas. Os lixiviados contendo diferentes espécies metálicas, muitas vezes não eram muito biocompatíveis, devido ao baixo pH e altas concentrações de metais tóxicos. Portanto, uma etapa de diluição ou correção de pH foi necessária ou o contato direto entre a biomassa viva foi evitado pelo uso de gases de fermentação bacteriana ou pré-metalização da biomassa, a fim de obter redução autocatalítica dos MGPs. Desta maneira, os autores conseguiram a recuperação seletiva e gradual de Pd, Pt, Cu e Au. Em adição, diversos estudos têm sido conduzidos com o intuito de se recuperar seletivamente ETRs leves, médios e pesados a partir de licores sintéticos de ETRs (HEIDELMANN et al., 2017; COIMBRA; NASCIMENTO: GIESE, 2017) e de resíduos eletro-eletrônicos (GIESE, 2017b).

4 | EFLUENTES LÍQUIDOS: POSSÍVEIS FONTES DE MINERAIS ESTRATÉGICOS?

Atualmente, alguns tipos de águas residuais estão sendo consideradas como fontes de energia ou nutrientes, e, portanto uma nova fonte para a recuperação de recursos (GAO; SCHERSON; WELLS, 2014). Porém, as águas residuais não são comumente caracterizadas pelo seu conteúdo de MGP e ETRs uma vez que as indústrias se concentram principalmente em gerarem relatórios contendo apenas as concentrações de espécies metálicas incluídas nos padrões de qualidade ambiental impostos pela legislação ambiental ao monitorar a qualidade de suas águas residuais. As poucas biotecnologias em grande escala aplicadas aos tipos de resíduos das indústrias de mineração ou de refino de metais foram desenvolvidas principalmente para remover elementos tóxicos a fim de cumprir as regulamentações (por exemplo, ABMet™ da General Electric; THIOTEQ™ da Paques).

Porém, dados da literatura científica indicam que um grande número de tipos de resíduos líquidos pode conter MGPs e ETRs em quantidades suficientes para garantir a sua recuperação de maneira sustentável. Por exemplo, as águas residuais municipais são há muito reconhecidas como fonte de MGPs, provenientes da poeira da estrada devido à deterioração de conversores catalíticos que leva à emissão de partículas contendo Pt e Pd em concentrações de mg/kg (EUROPEAN COMMISSION, 2001). Além disso, as águas residuais de hospitais e clínicas odontológicas contêm quantidades significativas de PGMs também. Por exemplo, a Pt pode ocorrer em concentrações entre 10-100 ng/L e 75 µg/L em águas residuais de hospitais devido aos fármacos

antineoplásicos cisplatina e carboplatina (LENZ et al., 2005; LENZ et al., 2007a,b). Além disso, esses efluentes também contêm baixas concentrações de Gd (até 100 µg/L), elemento presente em meios de contraste para ressonância magnética (KUMMERER; HELMERS, 2000; TELGMANN et al., 2012). Outras fontes potenciais para MGPs e ETRs incluem águas residuais de atividades industriais nos setores farmacêutico, de química fina, eletroquímica e de vidro, de drenagem ácida de mina e de processos de extração e separação em refinarias de metal.

A água dos recursos geotérmicos também tem sido descrita como uma fonte de MGP e ETR (SEGNERI; DERPIZIO, 2014). Durante a produção de energia geotérmica, grandes volumes de salmoura são extraídos da profundidade e descarregados após o resfriamento. Durante o período prolongado, a água aquecida percorre por rochas crustais e quantidades significativas de metais e minerais se dissolvem nos fluidos geotérmicos. Enquanto os metais mais abundantes nesses fluidos são os metais alcalinos-terrosos (por exemplo, Na⁺, Mg²⁺), podem ser detectados também MGP e ETRs incluindo Pt, Pd, Nd e Eu (LO et al., 2014). Os fluidos geotérmicos do Mar Salton, um dos corpos d'água mais ricos em metais do mundo, contém aproximadamente ~ 225 mg/L de Nd e ~ 300 mg/L de Eu (MICHARD, 1989). Consequentemente, a recuperação de MGP e ETRs oferece um meio de melhorar a viabilidade econômica da energia geotérmica. Os principais desafios impostos pelos fluidos geotérmicos são as altas temperaturas (~ 70-150° C), a concentração de 100 a 1.000 vezes maior de metais de baixo valor sobre os metais desejados e a presença de múltiplos MGPs ou ETRs.

Dois estudos relataram a recuperação de Pd a partir da refinação de metais (GAUTHIER et al., 2011) e da produção de conversores catalíticos (MALBERT et al., 2006) através da precipitação redutiva com as linhagens de *Desulfovibrio* e *Cupriavidus*. Devido às maiores concentrações de metais nesses tipos de resíduos em comparação com as águas residuais hospitalares ou municipais, torna-se economicamente mais interessante recuperá-los embora os volumes produzidos sejam razoavelmente baixos.

NGWENYA et al. (2006) demonstraram a absorção e precipitação redutiva de Rh de um efluente (produtor de MGP Anglo American Platinum) por um consórcio redutor de sulfato e suas enzimas extraídas. Finalmente, a recuperação de Ru a partir de um efluente da indústria de revestimento foi descrita usando adsorção seletiva em linhagens de *Rhodopseudomonas* (COLICA et al., 2012).

A eficácia da recuperação biometalúrgica das correntes de resíduos líquidos dependerá em grande parte da composição da matriz e da especiação química do metal alvo no resíduo. As correntes de resíduos líquidos mais atraentes têm frequentemente um pH extremo, um elevado total de sólidos dissolvidos e força iônica, e podem conter produtos orgânicos, solventes e metais tóxicos indesejáveis.

5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os MGPs e ETRs têm sido considerados minerais críticos devido à sua crescente demanda para uso no desenvolvimento de novas tecnologias cujas ofertas estão sob riscos consideráveis de suprimento face a questões tais como concentração em poucos produtores, segurança de suprimento, volatilidade de preços, dentre outras incerteza. Desta maneira, a recuperação destes metais a partir de tipos de resíduos líquidos e sólidos tem sido vista como uma alternativa para diminuir custos de exploração mineral e viabilizar o aumento da oferta destes minerais.

Em adição, as regulamentações e restrições ambientais cada vez mais rigorosas demandam por novos métodos hidrometalúrgicos para reciclagem e recuperação de MGPs e ETRs a partir dos diferentes tipos de resíduos, sejam sólidos ou líquidos, impulsionando o desenvolvimento de novos processos baseados no uso da biotecnologia. Neste sentido, os atuais processos biohidrometalúrgicos enfrentam desafios associados aos tipos complexos de resíduos (sólidos e líquidos) e sua toxicidade.

Assim, é justificável o investimento em novas pesquisas para a melhor compreensão das interações entre micro-organismos e minerais, a fim de impulsionar o desenvolvimento de bioprocessos eficazes para a separação, recuperação e reciclagem de metais críticos.

6 | AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) – Brasil pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BINNEMANS, K.; JONES, P.T.; BLANPAIN, B.; VAN GERVEN, T.; YANG, Y.; WALTON, A.; BUCHERT, M. Recycling of rare earths: a critical review. *Journal of Cleaner Production*, v. 51, p. 1-22, 2013.

BOSSHARD, P.P.; BACHOFEN, R.; BRANDL, H. Metal leaching of fly ash from municipal waste incineration by *Aspergillus niger*. *Environmental Science and Technology*, v. 30, p. 3066-3070, 1996.

BRANDL, H. Microbial leaching of metals. In: REHM, H.J.; ETRD, G.; editors. *Biotechnology*, v.10 Special Processes. Wiley-VCH Verlag GmbH; 2008. pp. 191-224.

CISION. DNI Reports Positive Preliminary Economic Assessment for its Buckton Polymetallic Ni-Co-Zn-Cu-U-REE-Y Black Shale Deposit, Alberta. 2013. Disponível em: <https://www.newswire.ca/news-releases/dni-reports-positive-preliminary-economic-assessment-for-its-buckton-polymetallic-ni-co-zn-cu-u-ree-y-black-shale-deposit-alberta-513381881.html>. Acesso: dezembro de 2018.

COIMBRA, N.V.; NASCIMENTO, M.; GIESE, E.C. Avaliação do uso de biomassa bacteriana imobilizada na biossorção de terras-raras leves e médias. *HOLOS*, v. 6, p. 136-146, 2017.

DE WINDT W, AELTERMAN P, VERSTRAETE W. Bioreductive deposition of palladium (0) nanoparticles on *Shewanella oneidensis* with catalytic activity towards reductive dechlorination of polychlorinated biphenyls. *Environmental Microbiology*, v. 7, p. 314-325, 2005.

DEPLANCHE, K.; CALDELARI, I.; MIKHEENKO, I.P.; SARGENT, F.; MACASKIE, L.E. Involvement of hydrogenases in the formation of highly catalytic Pd(0) nanoparticles by bioreduction of Pd(II) using *Escherichia coli* mutant strains. *Microbiology-Sgm*, v. 156, p. 2630-2640, 2010.

DENG, X.; CHAI, L.; YANG, Z.; TANG, C.; WANG, Y.; SHI, Y. Bioleaching mechanism of heavy metals in the mixture of contaminated soil and slag by using indigenous *Penicillium chrysogenum* strain F1. *Journal of Hazardous Materials*, v. 248-249, p. 107-114, 2013.

EHRlich, H.L. Technical potential for bioleaching and biobeneficiation of ores to recover base metals (other than iron or copper), platinum-group metals and silver. In: RAWLINGS, D. E., editor. *Biomining*. Springer Berlin Heidelberg; 1997. pp. 129-150.

EUROPEAN COMMISSION. Pollutants in urban waste water and sewage sludge. 2001. p. 273.

FEIN, J.B.; BOILY, J.F.; YEE, N.; GORMAN-LEWIS, D.; TURNER, B.F. Potentiometric titrations of *Bacillus subtilis* cells to low pH and a comparison of modeling approaches. *Geochimica Cosmochimica Acta*, v. 69, p. 1123-1132, 2005.

FEIN, J.B.; DAUGHNEY, C.J.; YEE, N.; DAVIS, T.A. A chemical equilibrium model for metal adsorption onto bacterial surfaces. *Geochimica Cosmochimica Acta*, v. 61, p. 3319-3328, 1997.

GADD, G.M. Fungal production of citric and oxalic acid: Importance in metal speciation, physiology and biogeochemical processes. *Advances in Microbial Physiology*, v. 41, p. 47-92, 1999.

GADD, G.M. Bioremediation potential of microbial mechanisms of metal mobilization and immobilization. *Current Opinion on Biotechnology*, v. 11, p. 271-279, 2000.

GADD, G.M. Biosorption: critical review of scientific rationale, environmental importance and significance for pollution treatment. *Journal of Chemistry Technology and Biotechnology*, v. 84, p. 13-28, 2009.

GAO, H.; SCHERSON, Y.D.; WELLS, G.F. Towards energy neutral wastewater treatment: methodology and state of the art. *Environ Science: Process & Impacts*, v. 16, p. 1223-1246, 2014.

GAUTHIER, D.; SOBJERG, L.S.; JENSEN, K.M.; LINDHARDT, A.T.; BUNGE, M.; FINSTER, K.; MEYER, R.L.; SKRYDSTRUP, T. Environmentally benign recovery and reactivation of palladium from industrial waste by using Gram negative bacteria. *ChemSusChem*, v. 3, p. 1036-1039, 2011.

GIESE, E.C. Biofilmes: a interação micro-organismo/substrato mineral na biolixiviação. Série Tecnologia Ambiental, Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, p. 9-41, 2014.

GIESE, E.C.; MAGALHÃES, D.P.; EGLER, S.G. Biossorção de Elementos de Terras-Raras. Série Tecnologia Ambiental, Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, p. 9-40, 2016.

GIESE, E.C. Biolixiviação: uma avaliação das inovações tecnológicas na biomineração de minerais sulfetados no período de 1991 a 2015. Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração, v. 14, p. 192-203, 2017a.

GIESE, E.C. Tendências européias para o uso dos recursos de Terras-Raras. Série Estudos e Documentos, Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, p. 9-23, 2017b.

GIESE, E.C.; XAVIER, L.H.; LINS, F.A.F. Biomineração urbana: o futuro da reciclagem de resíduos eletroeletrônicos. Brasil Mineral, n. 385, p. 22-26, 2018.

GU, T.; RASTEGAR, S.O.; MOUSAVI, S.M.; LI, M.; ZHOU, M. Advances in bioleaching for recovery of metals and bioremediation of fuel ash and sewage sludge. Bioresource Technology, v. 261, p. 428-440, 2018.

HEIDELMANN, G.P.; ROLDÃO, T.M.; EGLER, S.G.; NASCIMENTO, M.; GIESE, E.C. Uso de biomassa de microalga para biossorção de lantanídeos. HOLOS, v. 6, p. 170-179, 2017.

HENNEBEL, T.; DE CORTE, S.; VERSTRAETE, W.; BOON, N. Microbial production and environmental applications of Pd nanoparticles for treatment of halogenated compounds. Current Opinion and Biotechnology, v. 23, p. 555-561, 2012.

HENNEBEL, T.; BOON, N.; MAES, S.; LENZ, M. Biotechnologies for critical raw material recovery from primary and secondary sources: R & D priorities and future perspectives. New Biotechnology, v. 32, p. 121-127, 2015.

KUMMERER, K.; HELMERS, E. Hospital effluents as a source of gadolinium in the aquatic environment. *Environmental Science and Technology*, v. 34, p. 573-577, 2000.

LENZ, K.; KOELLENSPERGER, G.; HANN, S.; WEISSENBACHER, N.; MAHNIK, S.N.; FUERHACKER, M. Fate of cancerostatic platinum compounds in biological wastewater treatment of hospital effluents. *Chemosphere*, v. 69, p. 1765-1774, 2007a.

LENZ, K.; MAHNIK, S.N.; WEISSENBACHER, N.; MADER, R.M.; KRENN, P.; HANN, S.; KOELLENSPERGER, G.; UHL, M.; KNASMUELLER, S.; FERK, F. Monitoring, removal and risk assessment of cytostatic drugs in hospital wastewater. *Water Science and Technology*, v. 56, p. 141-149, 2007b.

LENZ, K.; HANN, S.; KOELLENSPERGER, G.; STEFANKA, Z.; STINGEDER, G.; WEISSENBACHER, N.; MAHNIK, S.N.; FUERHACKER, M. Presence of cancerostatic platinum compounds in hospital wastewater and possible elimination by adsorption to activated sludge. *Science of the Total Environment*, v. 345, p. 141-152, 2005.

LO, Y-C.; CHENG, C-L.; HAN, Y-L.; CHEN, B-Y.; CHANG, J-S. Recovery of high-value metals from geothermal sites by biosorption and bioaccumulation. *Bioresource Technology*, v. 160, p. 182-190, 2014.

MABBETT, A.N.; SANYAHUMBI, D.; YONG, P.; MACASKIE, L.E. Biorecovered precious metals from industrial wastes: Single-step conversion of a mixed metal liquid waste to a bioinorganic catalyst with environmental application. *Environmental Science and Technology*, v. 40, p. 1015-1021, 2006.

MACASKIE, L.E.; CREAMER, N.J.; ESSA, A.M.M.; BROWN, N.L.A. new approach for the recovery of precious metals from solution and from leachates derived from electronic scrap. *Biotechnology Bioengineering*, v. 96, p. 631-639, 2007.

MICHARD, A. Rare earth element systematics in hydrothermal fluids. *Geochim Cosmochim Acta*, v. 53, p. 745-750, 1989.

MORIWAKI, H.; YAMAMOTO, H. Interactions of microorganisms with rare earth ions and their utilization for separation and environmental technology. *Applied and Microbiology and Biotechnology*, v. 97, p. 1-8, 2013.

NG, C.K.; SIVAKUMAR, K.; LIU, X.; MADHAIYAN, M.; JI, L.; YANG, L.; TANG, C.; SONG, H.; KJELLEBERG, S.; CAO, B. Influence of outer membrane c-type cytochromes on particle size and activity of extracellular nanoparticles produced by *Shewanella oneidensis*. *Biotechnology Bioengineering*, v. 110, p. 1831-1837, 2013.

NG, C.K.; TAN, T.K.C.; SONG, H.; CAO, B. Reductive formation of palladium nanoparticles by *Shewanella oneidensis*: role of outer membrane cytochromes and hydrogenases. *RSC Advances*, v. 3, p. 22498-22503, 2013.

NGWENYA, N.; WHITELEY, C.G. Recovery of rhodium(III) from solutions and industrial wastewaters by a sulfate-reducing bacteria consortium. *Biotechnology Progress*, v. 22, p. 1604-1611, 2006.

KREBS, W.; BROMBACHER, C.; BOSSHARD, PP.; BACHOFEN, R.; BRANDL, H. Microbial recovery of metals from solids. *FEMS Microbiology Reviews*, v. 20, p. 605-617, 1997.

PINA, R.; GERVILLA, F.; BARNES, S.J.; ORTEGA, L.; LUNAR, R. Distribution of platinum-group and chalcophile elements in the Aguablanca Ni-Cu sulfide deposit (SW Spain): Evidence from a LA-ICP-MS study. *Chemical Geology*, v. 302, p. 61-75, 2012.

POTYSZ, A.; VAN HULLEBUSCH, E.D.; KIERCZAK, J. Perspectives regarding the use of metallurgical slags as secondary metal resources – A review of bioleaching approaches. *Journal of Environmental Management*, v. 219, p. 138-152, 2018.

QU, Y.; LIAN, B. Bioleaching of rare earth and radioactive elements from red mud using *Penicillium tricolor* RM-10. *Bioresource Technology*, v. 136, p. 16-23, 2013.

RITTER, S.K. Making the most of red mud. *Chemical Engineering News*, v. 92, p. 33-35, 2014.

ROTARU, A-E.; JIANG, W.; FINSTER, K.; SKRYDSTRUP, T.; MEYER, R.L. Non-enzymatic palladium recovery on microbial and synthetic surfaces. *Biotechnology Bioengineering*, v. 109, p. 1889-1897, 2012.

SEGNERI, B.R.T.; DEPRIZIO, J. Thirty-Ninth workshop on geothermal reservoir engineering February 24–26; Stanford University, Stanford, California. 2014. Geologic provenance of rare earth elements in the United States, and their potential collocation with geothermal resources.

SOUZA, A.C.S.P.; NASCIMENTO, M.; GIESE, E.C. Desafios para a extração sustentável de minérios portadores de terras raras. HOLOS, *in press*.

TELGEMANN, L.; WEHE, C.A.; BIRKA, M.; KUNNEMEYER, J.; NOWAK, S.; SPERLING, M.; KARST, U. Speciation and isotope dilution analysis of gadolinium-based contrast agents in wastewater. *Environmental Science and Technology*, v. 46, p. 11929-11936, 2012.

YOPPS, D.L.; BAGLIN, E.G. Bacterial preoxidation of Stillwater Complex, MT, platinum-group metal flotation concentrate and recovery of platinum-group metals by cyanidation and other leachants. U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Mines; 1991.

VIJAYARAGHAVAN, K.; YUN, Y-S. Bacterial biosorbents and biosorption. *Biotechnol Advances*, v. 26, p. 266-291, 2008.

XAVIER, L.H.; LINS, F.A.F. Mineração urbana de resíduos eletrônicos: uma nova fronteira a explorar no Brasil. *Brasil Mineral*, n. 379, p. 22-26, 2018.

WATLING, H.R. Review of biohidrometallurgical metals extraction from polymetallic mineral resources. *Minerals*, v. 5, p. 1-60, 2015.

WU, S.; CHANG, Z.; WANG, K.; XIONG, W. Preparation and thermal behaviour of rare earth citrate hydrates. *Journal of Thermal Analytics*, v. 45, p. 199-206, 1995.

SÉRIES CETEM

As Séries Monográficas do CETEM são o principal material de divulgação da produção científica realizada no Centro. Até o final do ano de 2018, já foram publicados, eletronicamente e/ou impressos em papel, mais de 340 títulos, distribuídos entre as seis séries atualmente em circulação: Rochas e Minerais Industriais (SRMI), Tecnologia Mineral (STM), Tecnologia Ambiental (STA), Estudos e Documentos (SED), Gestão e Planejamento Ambiental (SGPA) e Inovação e Qualidade (SIQ). A Série Iniciação Científica consiste numa publicação eletrônica anual.

A lista das publicações poderá ser consultada em nossa homepage. As obras estão disponíveis em texto completo para download. Visite-nos em <http://www.cetem.gov.br/series>.

Últimos números da Série Estudos e Documentos

SED-98 – Mineração, desenvolvimento sustentável e o mercado de investimento socialmente responsável (ISR): Um estudo sobre a participação da Vale no índice de sustentabilidade empresarial (ISE). Ana Maria Botelho M. da Cunha, Gilse Barbosa Guedes e Márcia Viana de Sá Earp, 2019.

SED-97 – Diretrizes básicas para avaliação da qualidade de resultados analíticos. Jéssica Zickwolf Ramos, Líllian Maria Borges Domingos, Zuleica Carmen Castilhos, 2018.

SED-96 – Mineral resources and territories: human, socio-environmental and economic impacts. Francisco Rego Chaves Fernandes, Ana Maria Botelho Marinho da Cunha, Eliane Rocha Araujo, Keila Valente de Souza, Renata Damico Olivieri, Renata de Carvalho Jimenez Alamino, Rodrigo Braga da Rocha Villa Verde, 2018.

INFORMAÇÕES GERAIS

CETEM – Centro de Tecnologia Mineral
Avenida Pedro Calmon, 900 – Cidade Universitária
21941-908 – Rio de Janeiro – RJ
Geral: (21) 3865-7222
Biblioteca: (21) 3865-7218
E-mail: biblioteca@cetem.gov.br
Homepage: <http://www.cetem.gov.br>

NOVAS PUBLICAÇÕES

Se você se interessar por um número maior de exemplares ou outro título de uma das nossas publicações, entre em contato com a nossa biblioteca no endereço acima.

Solicita-se permuta.

We ask for interchange.



Missão Institucional

Desenvolver tecnologias inovadoras e sustentáveis, e mobilizar competências visando superar desafios nacionais do setor mineral.

O CETEM

O Centro de Tecnologia Mineral - CETEM é um instituto de pesquisas, vinculado ao Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações - MCTIC, dedicado ao desenvolvimento, à adaptação e à difusão de tecnologias nas áreas minerometalúrgica, de materiais e de meio ambiente.

Criado em 1978, o Centro está localizado no campus da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, na Cidade Universitária, no Rio de Janeiro e ocupa 20.000m² de área construída, que inclui 25 laboratórios, 4 plantas-piloto, biblioteca especializada e outras facilidades.

Durante seus 41 anos de atividade, o CETEM desenvolveu mais de 800 projetos tecnológicos e prestou centenas de serviços para empresas atuantes nos setores minerometalúrgico, químico e de materiais.