



Potencial do uso de cianobactérias da Amazônia brasileira na recuperação de áreas degradadas pela mineração ilegal

Mayque Paulo Miranda de Souza¹, Miguel Ángel Cáceres Durán², Pablo Abdon da Costa Francez³

Resumo

A mineração é uma atividade de extrema importância para um país, e ajuda a refletir na melhora da qualidade socioeconômica da população, com a geração de bens de consumo. Por outro lado, o não-cuidado com as áreas exploradas, como acontece geralmente em crimes ambientais, como a mineração ilegal, pode gerar graves consequências para o meio ambiente, afetando não somente a flora e fauna da região, mas também poluindo recursos hídricos importantes. Pensando nisso, formas alternativas e ecologicamente mais corretas, precisam ser consideradas. Neste contexto, a utilização de microrganismos com características de resistência a metais, tais como a bioacumulação e biossorção, presentes em cianobactérias, pode ser uma alternativa eficaz e com menor impacto ambiental. O objetivo deste trabalho foi identificar espécies/gêneros de cianobactérias reportados na literatura, como sendo capazes de remover metais, e a partir disso, evidenciar cianobactérias da região amazônica com potencial de biorremediação de áreas contaminadas com metais. Para o desenvolvimento do trabalho de revisão, foram selecionados 33 artigos científicos, dentre os anos de 1998 e 2021, e identificou-se os gêneros *Nostoc*, *Anabaena* e *Microcystis*, como sendo os gêneros mais representativos de cianobactérias encontrados na região da Amazônia brasileira, com grande potencial de utilização na recuperação de ambientes contaminados com metais.

Palavras-Chave: Cianobactéria, Biorremediação, Bioacumulação, Biossorção e Ambiente Amazônico

Potential of use of cyanobacteria from the Brazilian Amazon in the recovery of areas degraded by illegal mining. Mining is an extremely important activity for a country and helps to reflect on the improvement of the socioeconomic quality of the population, with the generation of consumer goods. On the other hand, failure to take care of the exploited areas, as usually happens in environmental crimes, such as illegal mining, can generate serious consequences for the environment, affecting not only the flora and fauna of the region, but also polluting important water resources. Thinking about it, alternative and ecologically more correct forms need to be considered. In this context, the use of microorganisms with characteristics of resistance to metals, such as bioaccumulation and biosorption, present in cyanobacteria, can be an effective alternative with less environmental impact. The aim of this work was to identify species/genera of cyanobacteria reported in the literature as being able to remove metals, and from this to evidence cyanobacteria from the Amazon region with potential

¹ Doutorando no PPGBPA, UEPA, Belém, Pará, Brasil mmirand7@kent.edu

² Doutorando no PPGBM, UFPA, Belém, Pará, Brasil, macdur@gmail.com

³ Professor do INFOR e Perito Criminal na POLITEC-AP, Macapá, Amapá, Brasil pabdon37@mail.com



for bioremediation of areas contaminated with metals. For the development of the review work, 33 scientific articles were selected, between the years 1998 and 2021, and the genera *Nostoc*, *Anabaena* and *Microcystis* were identified as the most representative genera of cyanobacteria found in the Brazilian Amazon region, with great potential for use in the recovery of environments contaminated with metals.

Keywords: Cyanobacteria, Bioremediation, Bioaccumulation, Biosorption and Amazonian Environment

1. Introdução

A mineração é uma importante atividade econômica que contribui para o desenvolvimento de um país. Com o aumento populacional, cada dia mais necessita-se de minerais para atender às crescentes demandas. O conforto e a tecnologia vistas atualmente, se dá através da diversidade de substâncias minerais que servem de matéria-prima para muitos produtos utilizados no nosso dia a dia (IBRAM, 2012).

A nível mundial, o Brasil se destaca como um dos principais países com maiores reservas minerais, e está entre os que mais exportam esses recursos, destacando-se sobretudo na exportação de Bauxita, Caulim, Ferro (Fe), Cobre (Cu), Estanho (Sn), Nióbio (Nb), Níquel (Ni), Ouro (Au), Cromo (Cr) e Manganês (Mn) (IBRAM, 2019).

Apesar da sua grande importância, a atividade mineradora pode propiciar inúmeros impactos ambientais, dentre eles, a redução da flora e fauna nativa da região explorada, e ocasionalmente, poluição do meio ambiente, uma vez que resíduos gerados pela atividade mineradora podem conter um ou mais metais, que por sua vez, são potenciais poluidores de recursos hídricos (VEIGA e HINTON 2002, ERMITE-CONSORTIUM, YOUNGER e WOLKERSDORFER, 2004; ASSESSMENT, 2007).

No Brasil, a atividade de garimpo é autorizada pelas leis nº 7.805/1989 e nº 11.685/2018 (BRASIL 1989 e BRASIL 2008), porém vive cercada de polêmicas, já que ao mesmo tempo que contribui para o desenvolvimento econômico do país, esta atividade também provoca a degradação do meio ambiente.

A mineração ilegal é crime, de acordo com o Art. 21 da Lei nº 7.805/1989, que diz que, a realização de trabalhos de extração de substâncias minerais, sem a competente permissão, concessão ou licença, constitui crime, sujeito a penas de reclusão de 3 (três) meses a 3 (três) anos e multa (BRASIL, 1989).

A utilização de mercúrio e outros metais na mineração em território brasileiro, também é considerada ilegal, já que a utilização desses metais pode gerar uma gama de problemas, como o despejo inadequado de substâncias que apresentam alta toxicidade e propriedades de bioacumulação, gerando assim risco de contaminação para seres humanos e outros animais, como os peixes, que vivem nas proximidades de áreas de garimpo e mineração ilegal, e que fazem parte da cadeia alimentar de outros animais, incluindo nós, humanos (MOISEENKO e GASHKINA, 2016; SOUZA-ARAUJO, 2016).

Sendo assim, a remediação de ambientes contaminados, como as áreas de garimpo ilegal, tem ganhado grande visibilidade no que se refere principalmente a utilização de métodos biológicos, em detrimento aos métodos físico-químicos, os quais incluem troca iônica, osmose reversa, filtração, redução da oxidação, técnicas de imobilização e métodos baseados em membrana, uma vez que a utilização de microrganismos apresenta uma alternativa mais ecologicamente correta, além de outros benefícios, os quais são possíveis destacar: alta eficiência prospectiva, baixo custo de operação e bom desempenho em baixas concentrações de metais (MCCARTHY, et al., 2017; CHAKDAR et al., 2022).



Dentro deste cenário, as cianobactérias, que são microrganismos procariontes com capacidade fotossintetizante, se destacam como candidatas promissoras à biorremediação, pois, assim como algumas bactérias, apresentam sistemas especializados de resistência aos metais (KUMAR, PAVAN, MAHABOOBI e SATYAM, 2016; SAXENA e BHARAGAVA, 2020).

Alguns mecanismos de resistência a metais presentes em cianobactérias, como a bioacumulação e biossorção, podem ser mais bem aproveitados para o desenvolvimento de tecnologias que causem menos danos ao meio ambiente a fim de diminuir os problemas de contaminação ocasionados por crimes ambientais (FOKINA, et al., 2017; PANDEY, 2017).

Neste contexto, o objetivo deste trabalho consistiu em realizar um levantamento bibliográfico acerca da utilização de cianobactérias na remoção de metais, elucidando os mecanismos de resistência aos metais, e evidenciar espécies/gêneros de cianobactérias encontradas na região amazônica, com potencial de uso na biorremediação de áreas contaminadas por metais, provenientes da mineração ilegal.

2. Metodologia

2.1 Proposta do estudo e base de dados

A proposta do estudo foi de realizar uma revisão do acervo de documentos bibliográficos, baseados em artigos científicos disponíveis nas bases de dados das bibliotecas virtuais SciELO, PubMed, LILACS e outros sites especializados que possuem informações referentes ao tema.

2.2 Limite do Tempo

Foram selecionadas produções científicas publicadas entre os anos de 1990 e 2021. Entretanto, também foram aceitos trabalhos publicados fora do período pré-estabelecido, uma vez que, estes continham importantes evidências científicas para o desenvolvimento do presente estudo. Este recorte temporal foi escolhido em função da maior disponibilidade de bibliografia disponíveis, bem como, serem os documentos mais atuais referentes ao assunto abordado.

2.3 Critérios de Inclusão

As buscas nas bases de dados foram realizadas nas línguas portuguesa e inglesa por meio de indexadores relacionados ao trabalho, os quais incluíram: "cianobactéria", "mineração ilegal", "crimes ambientais", "biorremediação", "Amazônia", "metais", "garimpo", "biossorção", "bioacumulação" "cyanobacteria", "illegal mining", "environmental crimes", "bioremediation", "Amazon rainforest", "metals", "gold-digging", "biosorption" e "bioaccumulation".

Já os critérios de exclusão foram: teses, dissertações, comunicações em congresso e referências de trabalho.

3. Resultados e Discussão

3.1 Seleção dos trabalhos para o desenvolvimento do artigo de revisão

Foram selecionados 40 trabalhos para o desenvolvimento desta revisão, os quais incluíram artigos originais e artigos de revisão, relacionados ao tema proposto, e publicados dentro do tempo limite estabelecido. Adicionalmente, livros e páginas da web com informações relevantes para o desenvolvimento do trabalho, como por exemplo, leis constitucionais e relatórios anuais, também foram utilizados, o que totalizou em 48 referências utilizadas para o seu desenvolvimento.

3.2 Região amazônica e Cianobactérias

A Bacia Amazônica é uma das 12 Bacias Hidrográficas do Brasil, possui aproximadamente 7 milhões de km² de extensão, no qual cerca de 4 milhões de km² estão no território brasileiro, o que corresponde em torno de 42% do território desse país, e é considerada a maior bacia do Brasil e do mundo em área (6,5 milhões km²) (NICOLODI, ZAMBONI e BARROSO, 2009).

Neste contexto, a região amazônica apresenta uma abundante biodiversidade, ainda pouca estudada e explorada. Elevada temperatura, umidade e incidência de raios solares, característicos da região amazônica, possibilitam o crescimento próspero de cianobactérias nessa região (GENUÁRIO, VAZ, e MELO, 2017). Algumas sequências de genomas de cianobactérias encontradas no ambiente amazônico, já foram depositadas no National Center for Biotechnology Information (NCBI) e estudos prévios mostraram que essas linhagens exibem uma grande diversidade de metabólitos com os mais variados interesses biotecnológicos, e de grande potencial para a biorremediação de ambientes contaminados por metais pesados, principalmente metais, como: cádmio e cromo, provenientes de rejeitos de mineração (LIMA, et al., 2014; LEÃO, et al., 2016; LIMA, et al., 2017).

3.3 Cianobactérias e mecanismos de resistência a metais

Na literatura, várias espécies e gêneros de cianobactérias têm sido identificados e relatados em ambientes contaminados com metais, como em ambientes contaminados com cádmio e arsênio, por exemplo (TAM, 1998). As cianobactérias são consideradas microrganismos potencialmente biorremediadores e preferíveis para essa finalidade, já que são microrganismos que muitas vezes estão presentes no próprio ambiente que necessita de remediação, e por serem capazes capturar e/ou armazenar metais através de mecanismos de resistência a metais, tais como a bioacumulação (intracelular) e biossorção (extracelular) (TAM, 1998) (Fig. 1).

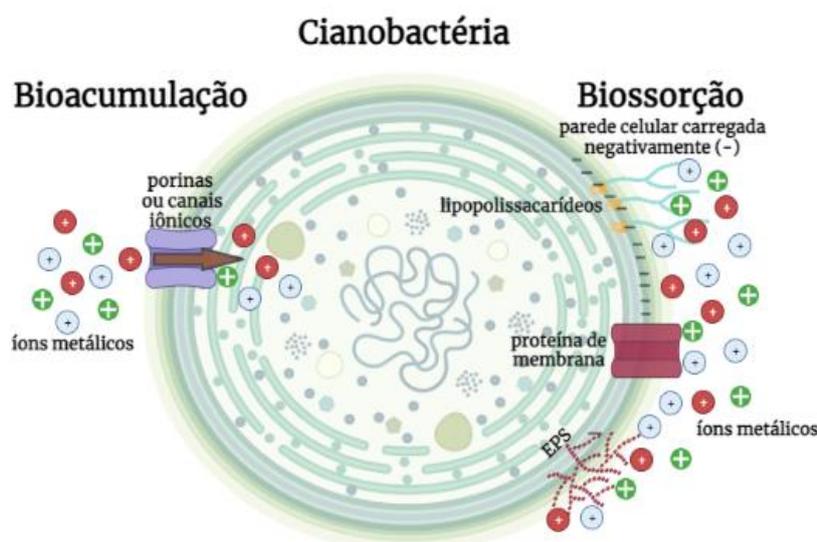


Figura 1. Mecanismos de bioacumulação, acúmulo de íons metálicos dentro de cianobactérias e biossorção, retenção de íons metálicos na superfície de cianobactérias.

3.4 Bioacumulação

A bioacumulação pode ser definida como o mecanismo que consiste na acumulação de substâncias químicas e metais em seres vivos, envolvendo o sequestro enzimático de íons metálicos para dentro da célula. Esse mecanismo ocorre quando os



gradientes de íons metálicos extracelulares são maiores do que os intracelulares, o que faz com que o transporte dos íons metálicos para dentro da célula seja iniciado, ocasionando assim, a bioacumulação (ARUNAKUMARA e ZHANG, 2008). Os íons metálicos são translocados da membrana externa das células para o periplasma por proteínas transmembranares, como as porinas. Por outro lado, o transporte de íons de metais do periplasma para o citoplasma, ocorre devido a atividade de proteínas canais, ou proteínas transportadoras. Uma vez que os íons metálicos estejam presentes no citoplasma, eles podem ser transformados em formas menos tóxicas ou inofensivas pela atividade metabólica celular e podem formar complexos com proteínas, peptídeos ou sais (DIEP, MAHADEVAN e YAKUNIN, 2018). Todavia, se esse mecanismo falhar, as células podem experimentar os efeitos tóxicos que as elevadas concentrações de metais pesados proporcionam.

3.5 Biossorção

Biossorção é o processo físico-químico pelo qual moléculas, átomos ou íons ficam retidos na superfície de uma substância. Além do mecanismo de bioacumulação, os metais pesados também podem ser capturados por meio independente da atividade metabólica celular (biossorção), devido à parede celular de microrganismos, como às cianobactérias, ser carregada negativamente, resultando assim em interações iônicas com os íons de metais (carregados positivamente) (DAVISON, 2005). Os grupos carboxila do peptidoglicano, presente na parede celular desses microrganismos, fornecem excelentes superfícies de adsorção para os metais.

Adicionalmente, a adsorção pode ocorrer ligando os metais pesados às proteínas de membrana, lipopolissacarídeos, exopolissacarídeos e lipídios. Uma vez que os grupos funcionais com carga negativa se encontram na parede celular dos microrganismos, o processo de biossorção pode ser empregado tanto com biomassa de microrganismos vivos, quanto de mortos (SAHMOUNE e LOUHAB, 2010).

A biossorção também pode ocorrer por meio de diferentes mecanismos que envolvem a presença de grupos funcionais de receptores de peptidoglicano na superfície celular, dentre os quais se destacam os amplamente estudados exopolissacarídeos (EPS), que são polímeros de alto peso molecular, de ocorrência natural e que devido a sua composição e estrutura apresentar elevado grau de anionicidade, atuam no sequestro de metais a partir de diferentes mecanismos, os quais incluem: troca iônica, adsorção, quelação/complexação, e precipitação superficial (GUPTA e DIWAN, 2017).

Alguns estudos relatam que dependendo da espécie de cianobactéria, a biossorção mediada por EPS em soluções de metal único funciona melhor do que em soluções contendo vários metais, devido a fatores como: não interação, sinergia, competitividade, sítios de ligação específico a certos íons metálicos e abundância de regiões carregadas negativamente do EPS (GUPTA e DIWAN, 2017; MICHELETTI, et al., 2008). Portanto, ao utilizar biomassa viva de cianobactérias no processo de biossorção, é necessário compreender o crescimento das espécies a serem utilizadas na biorremediação, bem como, seus níveis ideais de absorção aos metais alvos devem ser determinados através da curva EC50 (metade da concentração efetiva máxima), já que a exposição à íons de metais pesados pode acarretar diferentes alterações fisiológicas, comprometendo assim o processo de biorremediação (OZTURK, ASLIM e SULUDERE, 2009).

3.6 Cianobactérias e mecanismos de defesa contra toxicidade induzida por metais



Quando íons de metais pesados entram nas células, eles geram estresse fisiológico devido ao excesso de capacidade de armazenamento de metal das células. Os efeitos tóxicos dos íons de metais pesados sobre as cianobactérias assumem muitas formas e podem bloquear os grupos funcionais de moléculas importantes, ocasionando espécies reativas do oxigênio (ROS), induzindo a danos celulares, que levam a morte celular (KAPLAN, 2013). Para combater a toxicidade induzida por metais, as cianobactérias têm diferentes estratégias, sendo a primeira linha de defesa, os já citados anteriormente EPS. Os grupos funcionais negativos contidos nos EPS são capazes de quelar uma grande quantidade de íons de metais pesados (KAPLAN, 2013; DE PHILIPPIS, COLICA e MICHELETTI, 2011). Outro mecanismo de defesa utilizado pelas cianobactérias para conter a toxicidade de metais, quando estes entram através de diferentes proteínas transportadoras, é a síntese de peptídeos capazes de se ligarem aos metais, o que acaba comprometendo os danos que os íons de metais pesados causariam nas células (DE PHILIPPIS, COLICA e MICHELETTI, 2011; BALZANO, et al., 2020).

3.7 Cianobactérias na remoção de metais

Diferentes espécies de cianobactérias são capazes de sequestrar íons de metais pesados presentes na água, a partir do mecanismo de bioabsorção, como exemplo, as do gênero *Nostoc*, ou bioacumulação, como é o caso do gênero *Spirulina*, ou ainda, de ambas as formas, como as cianobactérias do gênero *Synechococcus* (Tab. 1) (AL-AMIN, et al., 2021). O gênero *Synechococcus* é o gênero de cianobactéria que detém a maior variedade de captura de cátions metálicos, os quais incluem: Cu^{+2} , Ni^{+2} , Pb^{+2} , Cd^{+2} , Cr^{+3} , Cr^{+4} , Zn^{+2} , Co^{+3} , Hg^{+2} e, Ag^{+2} , entretanto, com baixa eficácia de remoção de íons (variando de 34% a 50%) (GARDEA-TORRESDEY, et al., 1998). Por outro lado, estudos apontam que cianobactérias dos gêneros *Spirulina*, *Tolypothrix*, *Anabaena*, *Nostoc* e *Limnocooccus* obtêm grande eficácia de remoção de íons de metais pesados, variando de 63,23% observado para *Limnocooccus* e 96,42% reportado para o gênero *Nostoc* (PALANISWAMY e VELUCHAMY, 2017; GOSWAMI, SYIEM e PAKSHIRAJAN, 2015, ROY, et al., 2015; SEN, et al., 2018).

Deng et. al., 2020, através de experimentos de bancada, observaram que o acúmulo de íons de zinco e cádmio por *Microcystys aeruginosa* aumentou exponencialmente com o aumento da concentração inicial desses íons no meio de cultura. Adicionalmente, verificaram que baixas concentrações (< 0,1 mg/l) de Zn e Cd tiveram pouca influência no crescimento e processos fisiológicos dessas cianobactérias, indicando que *Microcystys aeruginosa* tem um potencial considerável na biorremediação de ambientes contaminado por cátions metálicos, onde as concentrações são inferiores a 0,1 mg/L.

Relacionado à bioacumulação de metais em cianobactérias envolvendo o gênero *Nostoc* submetidas a diferentes sistemas polimetálicos contendo metais como cromo, ferro, níquel e zinco, mostrou-se que estas cianobactérias foram capazes de bioacumular quantidades significativamente maiores do que os sistemas controles, como ocorreu com os teores de cromo, que variaram entre 1190 a 3300 $\mu\text{g/g}$ de biomassa seca de cianobactéria, em comparação com o teor de cromo detectado na biomassa controle (3,4 $\mu\text{g/g}$), e a quantidade de ferro, que variou de 3060 a 7100 $\mu\text{g/g}$ nos sistemas polimetálicos, enquanto que no grupo controle, o seu nível atingiu valores consideravelmente menores (820 $\mu\text{g/g}$) (CEPOL, et al., 2022). Os teores de níquel, zinco e cobre na biomassa seca de cianobactérias também foram maiores do que os seus respectivos controles, sugerindo assim o potencial de cianobactérias desse gênero na biorremediação de ambientes contaminados com esses metais.



É importante destacar que, embora a remoção de metais pesados mediada por cianobactérias seja um método eficaz, este processo é mais lento do que os processos físico-químicos tradicionais. Por outro lado, os métodos convencionais são considerados trabalhosos e caros, além de muitas vezes serem ineficientes (AYANGBENRO e BABALOLA, 2017; CHENG et al., 2019). Adicionalmente, a utilização de cianobactérias para a biorremediação pode representar um risco, haja vista que a floração de cianobactérias pode acarretar desequilíbrio dos ecossistemas aquáticos, pois algumas espécies criam um biofilme superficial que altera a transparência do meio, acarretando à desoxigenação do corpo d'água, além de que algumas espécies são tóxicas, como é o caso das espécies *Anabaena circinalis* e *Microcystis aeruginosa* (PALANISWAMY e VELUCHAMY, 2017; EL-BESTAWY, 2008).

Dito isto, antes de implementar as estratégias de biorremediação de áreas contaminadas por metais pesados, utilizando cianobactérias, é necessário identificar cuidadosamente as espécies tóxicas, caracterizar seus metabólitos secundários, potencialmente prejudiciais, e por fim, avaliar os possíveis riscos gerados ao introduzir esses microrganismos no ambiente. O processo de biossorção, utilizando biomassa de cianobactérias mortas, matando-as por meio da otimização da temperatura, pode ser o processo escolhido nos casos de espécies tóxicas, visto que, este independe da atividade metabólica das células, como é o caso do mecanismo de bioacumulação (SAHMOUNE e LOUHAB, 2010).

Após a biorremediação, algumas tecnologias disponíveis podem ser aplicadas na remoção de cianobactérias, as quais incluem: a coagulação/floculação-sedimentação, filtração em areia e filtração por membrana. Essas técnicas permitem remover entre 85 e 99% de células intactas de cianobactérias. Sistemas de filtragem de areia são de baixo custo e com eficiências aceitáveis (>85%) (HE et al., 2016; MEREL et al., 2013), embora com a inconveniência de que seja realizada retrolavagem regular dos filtros, uma vez que, se realizada de forma inadequada, pode levar à lise celular e a liberação de cianotoxinas na água (MUNOZ et al., 2021).

Tabela 1. Espécies de cianobactérias capazes de sequestrar íons metálicos presentes na água

Cianobactéria (espécie)	íon metálico	Processo de remoção e Eficiência	Referência
<i>Anabaena doliolum</i>	Cd ⁺²	Biossorção/ 69 - 92%	(GOSWAMI, SYIEM e PAKSHIRAJAN, 2015)
<i>Tolypothrix ceytonica</i>	Cu ⁺² , Zn ⁺²	Biossorção/ 86,12 – 94,63%	(GOSWAMI, SYIEM e PAKSHIRAJAN, 2015)
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	Ag ⁺² , Cu ⁺² , Cd ⁺² , Zn ⁺²	Biossorção/ Não Reportado	(HARRIS e RAMELOW, 1990)
<i>Microcystis sp.</i>	Cd ⁺² , Cu ⁺² , Cr ⁺⁴	Biossorção/ 24 - 87%	(RAI e TRIPATHI, 2007)
<i>Limnococcus sp.</i>	Cr ⁺⁴	Biossorção e Bioacumulação/ 63,23%	(SEN, et al., 2018)
<i>Nostoc muscorum</i>	Cu ⁺² , Zn ⁺² , Cd ⁺² , Pb ⁺² , Cr ⁺⁴	Biossorção e Bioacumulação/ 71,3 – 96,42%	(ROY, et al., 2015)



<i>Synechococcus</i> sp.	Cu ⁺² , Ni ⁺² , Pb ⁺² , Cd ⁺² , Cr ⁺³ , Cr ⁺⁴ , Zn ⁺² , Co ⁺³ , Hg ⁺² , Ag ⁺²	Biossorção e Bioacumulação/ 34 - 50%	(GARDEA-TORRESDEY, et al., 1998).
<i>Spirulina platensis</i>	Cu ⁺² , Pb ⁺² , Hg ⁺²	Bioacumulação/ 94,3%	(PALANISWAMY e VELUCHAMY, 2017)

3.8 Cianobactérias amazônicas com potencial de biorremediação de ambientes contaminados com metais pesados

Alguns gêneros de cianobactérias reportados como sendo promissores para a utilização na biorremediação, já foram identificados nos rios da Amazônia brasileira, como é o caso dos gêneros *Nostoc*, *Microcystis*, e *Anabaena*, encontrados no Rio Pará, Estado do Pará (LEÃO, et al., 2016; GOMES, et al., 2021). Contudo, ainda existe uma grande necessidade de caracterização da totalidade de espécies presentes nos rios dessa região. Uma vez que se tenha um amplo panorama sobre as espécies de cianobactérias encontradas na região amazônica, pesquisas visando aprofundar o conhecimento sobre o potencial de utilização desses microrganismos na biorremediação de áreas contaminadas com metais pesados, precisam ser desenvolvidos, para assim, colocar em prática a utilização desses métodos biológicos, que são menos agressivos ao meio ambiente, sobretudo, em regiões que sofreram com a mineração ilegal, atividade ainda muito presente na Amazônia brasileira.

4. Conclusão

A Amazônia Brasileira é uma região muito extensa e pouco explorada que abriga uma rica diversidade de espécies animais, vegetais e de microrganismos, que precisam ser mais bem caracterizados. Dentre as espécies de cianobactérias identificadas da região amazônica, é possível destacar as dos gêneros *Nostoc*, *Anabaena* e *Microcystis*, que já foram relatadas em outros estudos, como sendo capazes de remover alguns íons de metais pesados, como: Cd⁺², Cu⁺², Cr⁺⁴, Pb⁺² e Zn⁺², majoritariamente pelo método de biossorção, com exceção de cianobactérias do gênero *Nostoc*, que utilizam tanto o mecanismo de biossorção, quanto de bioacumulação.

A utilização de biomassa morta de cianobactérias, que pode ser empregada no processo de biossorção, é o mais indicado para a aplicação da biorremediação de ambientes contaminados com metais pesados, uma vez que, algumas espécies de cianobactérias são tóxicas para o ser humano e outros animais, como é o caso da *Microcystis aeruginosa*. Por fim, a utilização de biomassa viva de cianobactérias pode acarretar desequilíbrio ecológico, como exemplo, na desoxigenação do ambiente aquático, devido à elevada proliferação desses microrganismos.

Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer ao Instituto Nacional de Perícias e Ciências Forenses – INFOR/Belém pela oportunidade de desenvolver este trabalho, referente ao trabalho de conclusão do curso de Especialização em Biologia Molecular e Genética Forense do Instituto.

Divulgação

Este artigo é inédito e não está sendo considerado para qualquer outra publicação. O(s) autor(es) e revisores não relataram qualquer conflito de interesse durante a sua avaliação. Logo, a revista *Scientia Amazonia* detém os direitos autorais, tem a



aprovação e a permissão dos autores para divulgação, deste artigo, por meio eletrônico.

Referências

Al-Amin, Abdullah, Fahmida Parvin, Joydeep Chakraborty, e Yong-Ick Kim. "Cyanobacteria Mediated Heavy Metal Removal: A Review on Mechanism, Biosynthesis, and Removal Capability". *Environmental Technology Reviews* 10, nº 1 (1º de janeiro de 2021): 44–57. <https://doi.org/10.1080/21622515.2020.1869323>.

Arunakumara, K. K. I. U., e Xuecheng Zhang. "Heavy Metal Bioaccumulation and Toxicity with Special Reference to Microalgae". *Journal of Ocean University of China* 7, nº 1 (fevereiro de 2008): 60–64. <https://doi.org/10.1007/s11802-008-0060-y>.

Assessment, US EPA National Center for Environmental. "Heavy Metal Pollution and Human Biotoxic Effects". WEB SITE, 15 de março de 2009. https://hero.epa.gov/hero/index.cfm/reference/details/reference_id/467707.

Ayangbenro, Ayansina, e Olubukola Babalola. "A New Strategy for Heavy Metal Polluted Environments: A Review of Microbial Biosorbents". *International Journal of Environmental Research and Public Health* 14, no 1 (19 de janeiro de 2017): 94. <https://doi.org/10.3390/ijerph14010094>.

Balzano, Sergio, Angela Sardo, Martina Blasio, Tamara Bou Chahine, Filippo Dell'Anno, Clementina Sansone, e Christophe Brunet. "Microalgal Metallothioneins and Phytochelatins and Their Potential Use in Bioremediation". *Frontiers in Microbiology* 11 (28 de abril de 2020): 517. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00517>.

Brasil. Presidência da República. Casa Civil. LEI Nº 7.805, de 18 de julho de 1989. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l7805.htm>. Acesso em 17 de março de 2023.

Brasil. Presidência da República. Casa Civil. LEI Nº 11.685, de 2 de junho de 2008. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2008/lei/l11685.htm>. Acesso em 17 de março de 2023.

Cepoi, Liliana, Inga Zinicovscaia, Ana Valuta, Liviu Codreanu, Ludmila Rudi, Tatiana Chiriac, Nikita Yushin, Dmitrii Grozdov, e Alexandra Peshkova. "Bioremediation Capacity of Edaphic Cyanobacteria Nostoc Linckia for Chromium in Association with Other Heavy-Metals-Contaminated Soils". *Environments* 9, no 1 (janeiro de 2022): 1. <https://doi.org/10.3390/environments9010001>.

Chakdar, Hillol, Shobit Thapa, Amit Srivastava, e Pratyosh Shukla. "Genomic and Proteomic Insights into the Heavy Metal Bioremediation by Cyanobacteria". *Journal of Hazardous Materials* 424 (15 de fevereiro de 2022): 127609. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127609>.

Cheng, Sze Yin, Pau-Loke Show, Beng Fye Lau, Jo-Shu Chang, e Tau Chuan Ling. "New Prospects for Modified Algae in Heavy Metal Adsorption". *Trends in Biotechnology* 37, no 11 (novembro de 2019): 1255–68. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2019.04.007>.

Davison, Brian H. e USA, orgs. *Biotechnology for Fuels and Chemicals: The Twenty-Sixth Symposium; Proceedings of the Twenty-Sixth Symposium on Biotechnology for Fuels and Chemicals, Held May 9 - 12, 2004, in Chattanooga, TN*. Applied Biochemistry and Biotechnology, 121/124.2005. Totowa, NJ: Humana Press, 2005.

De Philippis, Roberto, Giovanni Colica, e Ernesto Micheletti. "Exopolysaccharide-Producing Cyanobacteria in Heavy Metal Removal from Water: Molecular Basis and Practical Applicability of the Biosorption Process". *Applied Microbiology and Biotechnology* 92, nº 4 (novembro de 2011): 697–708. <https://doi.org/10.1007/s00253-011-3601-z>.

Deng, Jiancai, Dongwang Fu, Weiping Hu, Xin Lu, Yonghong Wu, e Heather Bryan. "Physiological Responses and Accumulation Ability of Microcystis Aeruginosa to Zinc and Cadmium: Implications for Bioremediation of Heavy Metal Pollution". *Bioresource Technology* 303 (maio de 2020): 122963. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122963>.



Diep, Patrick, Radhakrishnan Mahadevan, e Alexander F. Yakunin. "Heavy Metal Removal by Bioaccumulation Using Genetically Engineered Microorganisms". *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* 6 (29 de outubro de 2018): 157. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2018.00157>.

El-Bestawy, Ebtesam. "Treatment of Mixed Domestic–Industrial Wastewater Using Cyanobacteria". *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology* 35, nº 11 (novembro de 2008): 1503–16. <https://doi.org/10.1007/s10295-008-0452-4>.

Ermite-Consortium, Paul L. Younger, e Christian Wolkersdorfer. "Mining Impacts on the Fresh Water Environment: Technical and Managerial Guidelines for Catchment Scale Management". *Mine Water and the Environment* 23, nº S1 (março de 2004): s2–80. <https://doi.org/10.1007/s10230-004-0028-0>.

Fokina, A. I., S. Yu. Ogorodnikova, L. I. Domracheva, E. I. Lyalina, E. A. Gornostaeva, T. Ya. Ashikhmina, e L. V. Kondakova. "Cyanobacteria as Test Organisms and Biosorbents". *Eurasian Soil Science* 50, nº 1 (janeiro de 2017): 70–77. <https://doi.org/10.1134/S106422931611003X>.

Gardea-Torresdey, J., J. Arenas, N. Francisco, K. Tiemann, e R. Webb. "Ability of Immobilized Cyanobacteria to Remove Metal Ions From Solution and Demonstration of the Presence of Metallothionein Genes in Various Strains". *Journal of Hazardous Substance Research* 1, nº 1 (1º de janeiro de 1998). <https://doi.org/10.4148/1090-7025.1001>.

Genuário, Diego Bonaldo, Marcelo Gomes Marçal Vieira Vaz, e Itamar Soares De Melo. "Phylogenetic Insights into the Diversity of Homocytous Cyanobacteria from Amazonian Rivers". *Molecular Phylogenetics and Evolution* 116 (novembro de 2017): 120–35. <https://doi.org/10.1016/j.ympev.2017.08.010>.

Gomes, Aline L., Celly J. S. Cunha, Marcelo O. Lima, Eliane B. De Sousa, Vanessa B. Costa-Tavares, e Jussara M. Martinelli-Lemos. "Biodiversity and Interannual Variation of Cyanobacteria Density in an Estuary of the Brazilian Amazon". *Anais Da Academia Brasileira de Ciências* 93 (22 de outubro de 2021): e20191452. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202120191452>.

Goswami, Smita, Mayashree B. Syiem, e Kannan Pakshirajan. "Cadmium Removal by *Anabaena Doliolum* Ind1 Isolated from a Coal Mining Area in Meghalaya, India: Associated Structural and Physiological Alterations". *Environmental Engineering Research* 20, nº 1 (março de 2015): 41–50. <https://doi.org/10.4491/eer.2014.059>.

Gupta, Pratima, e Batul Diwan. "Bacterial Exopolysaccharide Mediated Heavy Metal Removal: A Review on Biosynthesis, Mechanism and Remediation Strategies". *Biotechnology Reports* 13 (março de 2017): 58–71. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2016.12.006>.

Harris, Patricia O., e Gerald J. Ramelow. "Binding of Metal Ions by Particulate Biomass Derived from *Chlorella Vulgaris* and *Scenedesmus Quadricauda*". *Environmental Science & Technology* 24, nº 2 (fevereiro de 1990): 220–28. <https://doi.org/10.1021/es00072a011>.

He, X., Liu, Y.L., Conklin, A., Westrick, J., Weavers, L.K., Dionysiou, D.D., Lenhart, J.J., Mouser, P.J., Szlag, D., Walker, H.W., 2016. Toxic cyanobacteria and drinking water: Impacts, detection, and treatment. *Harmful Algae* 54, 174-193. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2016.01.001>.

IBRAM. Instituto Brasileiro de Mineração. MINERAÇÃO & ECONOMIA VERDE. 2012. 19p. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00002708.pdf>>. Acesso em 11 de março de 2023.

IBRAM. Instituto Brasileiro de Mineração. Relatório Anual de Atividades: julho de 2018 a junho de 2019. 2019. 49p. Disponível em: <<https://portaldaminerao.com.br/ibram/wp-content/uploads/2019/07/relatorio-anual-2018-2019.pdf>>. Acesso em 14 de março de 2023.

Kaplan, Drora. "Absorption and Adsorption of Heavy Metals by Microalgae". Em *Handbook of Microalgal Culture*, 602–11. Wiley, 2013. <https://doi.org/10.1002/9781118567166.ch32>.

Kumar, B. Naga pavan, S Mahaboobi, e S Satyam. "Cyanobacteria: A Potential Natural Source for Drug Discovery and Bioremediation". *Journal of Industrial Pollution Control* 32, nº 2 (1º de dezembro de 2016): 1–10. <https://www.icontrolpollution.com/peer-reviewed/cyanobacteria-a-potential-natural-source-for-drug-discovery-and-bioremediation-79255.html>.



Leão, Tiago, Pedro Ivo Guimarães, Aline Grasielle Costa De Melo, Rommel Thiago Jucá Ramos, Pedro Nuno Leão, Artur Silva, Marli Fatima Fiore, e Maria Paula Cruz Schneider. "Draft Genome Sequence of the N_2 - Fixing Cyanobacterium *Nostoc Piscinale* CENA21, Isolated from the Brazilian Amazon Floodplain". *Genome Announcements* 4, nº 2 (28 de abril de 2016): e00189-16. <https://doi.org/10.1128/genomeA.00189-16>.

Lima, Alex Ranieri Jerônimo, Wendel De Oliveira Castro, Pablo Henrique Gonçalves Moraes, Andrei Santos Siqueira, Délia Cristina Figueira Aguiar, Clayton Pereira Silva De Lima, João Lídio Silva Gonçalves Vianez Júnior, Márcio Roberto Teixeira Nunes, Leonardo Teixeira Dall'Agnol, e Evonnildo Costa Gonçalves. "Draft Genome Sequence of *Alkalinema* Sp. Strain CACIAM 70d, a Cyanobacterium Isolated from an Amazonian Freshwater Environment". *Genome Announcements* 5, nº 28 (13 de julho de 2017): e00635-17. <https://doi.org/10.1128/genomeA.00635-17>.

Lima, Alex Ranieri Jerônimo, Andrei Santos Siqueira, Bruno Garcia Simões Dos Santos, Fábio Daniel Florêncio Da Silva, Clayton Pereira Lima, Jedson Ferreira Cardoso, João Lídio Da Silva Gonçalves Vianez Júnior, et al. "Draft Genome Sequence of the Brazilian *Cyanobium* Sp. Strain CACIAM 14". *Genome Announcements* 2, nº 4 (28 de agosto de 2014): e00669-14. <https://doi.org/10.1128/genomeA.00669-14>.

McCarthy, Damien, Grant C. Edwards, Mae S. Gustin, Andrew Care, Matthieu B. Miller, e Anwar Sunna. "An Innovative Approach to Bioremediation of Mercury Contaminated Soils from Industrial Mining Operations". *Chemosphere* 184 (outubro de 2017): 694–99. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.06.051> .

Merel, S., Walker, D., Chicana, R., Snyder, S., Baurès, E., Thomas, O., 2013. State of knowledge and concerns on cyanobacterial blooms and cyanotoxins. *Environ. Int.* 59, 303-327. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.06.01>.

Micheletti, E., G. Colica, C. Viti, P. Tamagnini, e R. De Philippis. "Selectivity in the Heavy Metal Removal by Exopolysaccharide-Producing Cyanobacteria". *Journal of Applied Microbiology* 105, nº 1 (julho de 2008): 88–94. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2008.03728.x> .

Moiseenko, T. I., e N. A. Gashkina. "Bioaccumulation of Mercury in Fish as Indicator of Water Pollution". *Geochemistry International* 54, nº 6 (junho de 2016): 485–93. <https://doi.org/10.1134/S0016702916060045>

Munoz, Macarena, Samuel Cirés, Zahara M. de Pedro, José Ángel Colina, Yineth Velásquez-Figueroa, Javier Carmona-Jiménez, Angela Caro-Borrero, et al. "Overview of Toxic Cyanobacteria and Cyanotoxins in Ibero-American Freshwaters: Challenges for Risk Management and Opportunities for Removal by Advanced Technologies". *Science of The Total Environment* 761 (20 de março de 2021): 143197. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143197>

Nicolodi, João Luiz, Ademilson Zamboni, e Gilberto Fonseca Barroso. "Gestão Integrada de Bacias Hidrográficas e Zonas Costeiras no Brasil: Implicações para a Região Hidrográfica Amazônica". *Revista de Gestão Costeira Integrada* 9, nº 2 (junho de 2009): 9–32. <https://doi.org/10.5894/rgci115>

Ozturk, Sahlan, Belma Aslim, e Zekiye Suludere. "Evaluation of Chromium(VI) Removal Behaviour by Two Isolates of *Synechocystis* Sp. in Terms of Exopolysaccharide (EPS) Production and Monomer Composition". *Bioresource Technology* 100, nº 23 (dezembro de 2009): 5588–93. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.06.001>

Palaniswamy R, Veluchamy C. Biosorption of Heavy Metals by *Spirulina platensis* from Electroplating Industrial Effluent. *Environ Sci Ind J.* 2017;13(4):139.

Pandey, Vidya Dhar. "Cyanobacteria-Mediated Heavy Metal Remediation". Em *Agro-Environmental Sustainability: Volume 2: Managing Environmental Pollution*, organizado por Jay Shankar Singh e Gamini Seneviratne, 105–21. Cham: Springer International Publishing, 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-49727-3_6

Rai, Prabhat Kumar, e B. D. Tripathi. "Removal of Heavy Metals by the Nuisance Cyanobacteria *Microcystis* in Continuous Cultures: An Eco-Sustainable Technology". *Environmental Sciences* 4, nº 1 (março de 2007): 53–59. <https://doi.org/10.1080/15693430601164956>

Roy, Arindam Sinha, Jayeeta Hazarika, N. Arul Manikandan, Kannan Pakshirajan, e Mayashree B. Syiem. "Heavy Metal Removal from Multicomponent System by the Cyanobacterium *Nostoc Muscorum*: Kinetics and Interaction Study". *Applied Biochemistry and Biotechnology* 175, nº 8 (abril de 2015): 3863–74. <https://doi.org/10.1007/s12010-015-1553-y>



Sahmoune, Mohamed Nasser, e K. Louhab. "Kinetic Analysis of Trivalent Chromium Biosorption by Dead *Streptomyces Rimosus* Biomass", 2010. <http://192.168.100.2:8080//handle/123456789/2055>

Saxena, Gaurav, e Ram Naresh Bharagava, orgs. *Bioremediation of Industrial Waste for Environmental Safety: Volume I: Industrial Waste and Its Management*. Singapore: Springer Singapore, 2020. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-1891-7>

Sen, Gaurav, Sushovan Sen, Sohini Guha Thakurta, Jitmanyu Chakrabarty, e Susmita Dutta. "Bioremediation of Cr(VI) Using Live Cyanobacteria: Experimentation and Kinetic Modeling". *Journal of Environmental Engineering* 144, n° 9 (setembro de 2018): 04018089. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001425](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001425)

Souza-Araujo, J., T. Giarrizzo, M. O. Lima, e M. B. G. Souza. "Mercury and Methyl Mercury in Fishes from Bacajá River (Brazilian Amazon): Evidence for Bioaccumulation and Biomagnification: Mercury in Fishes in Amazonian Indigenous Areas". *Journal of Fish Biology* 89, n° 1 (julho de 2016): 249–63. <https://doi.org/10.1111/jfb.13027>.

Tam, Nora. "Metal Resistance and Accumulation in Cyanobacteria". *Wastewater Treatment with Algae*, 1º de janeiro de 1998. https://www.academia.edu/57957376/Metal_Resistance_and_Accumulation_in_Cyanobacteria

Veiga, Marcello M., e Jennifer J. Hinton. "Abandoned Artisanal Gold Mines in the Brazilian Amazon: A Legacy of Mercury Pollution". *Natural Resources Forum* 26, n° 1 (fevereiro de 2002): 15–26. <https://doi.org/10.1111/1477-8947.00003>.