

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**JULIA MARIA VIUDES COSTA**

**BIORREMEDIAÇÃO DE ÁGUAS NO BRASIL: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA  
ACERCA DA UTILIZAÇÃO DESSA METODOLOGIA EM PROCESSOS DE  
DESPOLUIÇÃO AQUÁTICA**

**CAMPO MOURÃO**

**2022**

**JULIA MARIA VIUDES COSTA**

**BIORREMEDIAÇÃO DE ÁGUAS NO BRASIL: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA  
ACERCA DA UTILIZAÇÃO DESSA METODOLOGIA EM PROCESSOS DE  
DESPOLUIÇÃO AQUÁTICA**

**Bioremediation of water in Brazil: a bibliographic review on the use of this  
methodology in aquatic depollution processes**

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
apresentada como requisito para obtenção do título de  
Licenciado em Química da Universidade Tecnológica  
Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Estela dos Reis Crespan

**CAMPO MOURÃO**

**2022**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**JULIA MARIA VIUDES COSTA**

**BIORREMEDIAÇÃO DE ÁGUAS NO BRASIL: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA  
ACERCA DA UTILIZAÇÃO DESSA METODOLOGIA EM PROCESSOS DE  
DESPOLUIÇÃO AQUÁTICA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título de  
Licenciado em Química da Universidade Tecnológica  
Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 23/novembro/2022

---

Estela dos Reis Crespan  
Doutora  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

---

Gustavo Pricinotto  
Doutor  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

---

Letícia Ledo Marcinuk  
Doutora  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

**CAMPO MOURÃO**

**2022**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente, aos meus pais, Lucineide e Agnaldo, que me deram a vida. Mais que permitir o meu nascimento e a minha existência no mundo, eles me ensinaram a ser. Ser humana, ser amada, ser feliz, ser melhor, ser grata, ser responsável, ser gentil, ser corajosa e ser o que eu sou e quiser ser. Ensinaram-me o amor e a amar. Tornaram possível o caminho que trilhei até aqui.

Agradeço aos meus professores que, admiravelmente e de forma excepcional, se mantiveram firmes em seu propósito educacional, que não mediram esforços para compartilhar comigo seus conhecimentos e mais profundos ensinamentos, que fizeram de sua profissão um instrumento humanizador e que possibilitaram minha expansão mental e transformação pessoal. Um obrigado especial à minha orientadora Estela que jamais desistiu de mim, me acolheu e com muito carinho, respeito e sabedoria me guiou durante esse percurso.

Agradeço aos meus amigos e familiares que estiveram comigo em minha caminhada e me auxiliaram das mais diversas formas. Agradeço, em especial, ao meu colega de faculdade, de profissão e da vida, Adil Junior, por estar presente nesse processo do início ao fim, me impulsionando em momentos difíceis e acreditando em mim constantemente.

Por fim, agradeço a todos e todas que lutam pelas universidades públicas no Brasil, que continuamente se posicionam e seguem se posicionando contra o desmonte destas instituições e que, desta forma, possibilitaram toda a minha jornada acadêmica.

## RESUMO

O Brasil é inegavelmente um dos países com maior disponibilidade hídrica no mundo, especialmente em razão de sua variabilidade climática, grande extensão territorial e das inúmeras bacias hidrográficas que o compõe. Ainda que sua riqueza em mananciais e cursos fluviais seja uma característica de grande importância no país, esse recurso se encontra em progressão contínua de escassez e poluição. Essas condições são pautadas na insustentabilidade durante os processos industriais, na ausência da gestão efetiva dos recursos hídricos e na falta de conhecimento e aplicação de tecnologias despoluidoras. Dentre muitas metodologias existentes para decompor poluentes e recuperar ecossistemas aquáticos, destaca-se a biorremediação, cujo foco é utilizar microrganismos para degradar poluentes persistentes. A ausência de complexidade nestes processos, a inibição da toxicidade e a grande adaptabilidade dos seres vivos tornam os mecanismos da biorremediação eficientes e sustentáveis. Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi revisar as principais metodologias de biorremediação em ambientes aquáticos pesquisadas e utilizadas no Brasil nos últimos 7 anos. Foram selecionados 8 trabalhos intrinsecamente químicos, integralmente aplicados no Brasil, com foco em descontaminação aquática e publicados após 2016. Nos artigos e teses analisados ficou evidente a importância da biorremediação em cursos fluviais e sua relevante aplicabilidade, especialmente pelo potencial das bactérias e fungos frente aos mais diversos poluentes. Além disso, a área da biorremediação traz consigo um amplo espaço para a pesquisa científica em termos físicos, químicos e biológicos, possibilitando, ainda, um avanço significativo no seu uso para melhorar a qualidade das águas do país, nutrir a consciência ambiental e favorecer a humanização da sociedade.

Palavras-chave: biorremediação; Brasil; água.

## **ABSTRACT**

It is undeniable that Brazil is one of the countries with the greatest water availability in the world, especially due to its climate variability, large territorial extension and the numerous hydrographic basins that compose it. Although the country's richness in springs and river courses is a characteristic of great importance, this resource is in continuous progression of scarcity and pollution. These conditions are based on unsustainability during industrial processes, the absence of effective management of water resources and the lack of knowledge and application of clean-up technologies. Among many existing methodologies to decompose pollutants and recover aquatic ecosystems, bioremediation stands out, whose focus is to use microorganisms to degrade persistent pollutants. The absence of complexity in these processes, the inhibition of toxicity and the great adaptability of living beings make bioremediation mechanisms efficient and sustainable. Therefore, the objective of this work was to review the main bioremediation methodologies in aquatic environments researched and used in Brazil in the last 7 years. Eight works published after 2016 were selected, intrinsically chemical and fully applied in Brazil, focusing on aquatic decontamination. In the analyzed articles and theses, the importance of bioremediation in river courses and its relevant applicability became evident, especially due to the potential of bacteria and fungi against the most diverse pollutants. In addition, the area of bioremediation brings with it a wide space for scientific research in physical, chemical and biological terms, allowing yet a significant advance in its use to improve the quality of the country's waters, nurture environmental awareness and favor humanization of society.

Keywords: biorremediation; Brazil; water.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Mapa de climas no Brasil.....	13
Figura 2 - Bacias hidrográficas no território brasileiro.....	16
Figura 3 - Águas subterrâneas.....	17
Figura 4 - Densidade populacional no Brasil em 2010.....	19
Figura 5 - Balanço hídrico integrado.....	20
Figura 6 - Uso consuntivo da água no Brasil.....	21
Figura 7 - Índice de Qualidade da Água em 2016.....	22
Figura 8 - Índice de Qualidade da Água em 2020.....	23
Figura 9 - Estrutura química da molécula tetra-azo Direct Black 22.....	34
Figura 10 - Descoloração do corante azo Direct Black 22 em diferentes concentrações por <i>Aspergillus</i> sp UCP1279 sob agitação (120 rpm) à 30°C.....	34
Figura 11 - Reação do triacilglicerol catalisado por lipase.....	35
Figura 12 - Dispersão de óleo de motor em água marinha pela adição do biosurfactante de <i>Pseudomonas cepacia</i> CCT6659.....	40
Figura 13 - Remoção completa de óleo de motor em pedra marinha pela adição do biosurfactante de <i>Pseudomonas cepacia</i> CCT6659.....	41
Figura 14 - Influência do biosurfactante formulado e isolado de <i>Pseudomonas Cepacia</i> CT6659 sobre o crescimento nativo na água do mar.....	42
Figura 15 - Biotransformação do metil p-cumarato pela ação do fungo <i>Aspergillus brasiliensis</i> .....	43
Figura 16 - Sistema construído combinado para o tratamento de água residuária têxtil sintética.....	44
Figura 17 - Remoção de metais pesados Co, Mn e Zn por <i>Bacillus safensis</i> 3A.....	46

## **LISTA DE TABELAS**

<b>Tabela 1 - Caracterização da água residual de lavagem de biodiesel.....</b>	<b>36</b>
<b>Tabela 2 - Caracterização do efluente do biodiesel após biorremediação</b>	<b>37</b>
<b>Tabela 3 - Microrganismos isolados e identificados.....</b>	<b>45</b>



## LISTA DE SÍMBOLOS

C	Carbono
Ca	Cálcio
Cd	Cádmio
Cl	Cloro
Co	Cobalto
H	Hidrogênio
Mg	Magnésio
Mn	Manganês
N	Nitrogênio
Na	Sódio
O	Oxigênio
S	Enxofre
U	Urânio
Zn	Zinco

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>13</b>
<b>2.1</b>	<b>Brasil e suas características geográficas.....</b>	<b>13</b>
<b>2.2</b>	<b>Água no Brasil.....</b>	<b>14</b>
<b>2.3</b>	<b>Demanda hídrica, disponibilidade e gestão de recursos.....</b>	<b>18</b>
<b>2.4</b>	<b>A crise hídrica brasileira.....</b>	<b>20</b>
<b>2.5</b>	<b>Biorremediação.....</b>	<b>25</b>
<b>3</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>31</b>
<b>3.1</b>	<b>Objetivos gerais.....</b>	<b>31</b>
<b>3.2</b>	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>31</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>32</b>
<b>5</b>	<b>DESENVOLVIMENTO.....</b>	<b>33</b>
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>48</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>49</b>
	<b>ANEXO A.....</b>	<b>53</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos países com maior extensão territorial no mundo e essa característica implica em alta variabilidade climática, vegetal, hidrográfica e de relevo, culminando em regiões com aspectos muito distintos (ROSS, 1996; TUCCI; HESPANHOL; CORDEIRO NETTO, 2001).

O país é banhado por 8 bacias hidrográficas e isto torna o Brasil um dos mais ricos em termos aquáticos, com 11% da água do mundo. As bacias interagem de forma sinérgica com os rios e com os reservatórios de água subterrânea distribuídos pelo território, contribuindo diretamente com a disponibilidade hídrica, com a manutenção do ciclo hidrológico e com a subsistência humana brasileira (TUCCI; HESPANHOL; CORDEIRO NETTO, 2001).

Sendo a fonte de toda vida na terra, a água carrega consigo uma importância primordial e insubstituível, tornando-se fundamental a compreensão de seu movimento e sua contínua proteção. Embora o Brasil seja de fato um local abundante no que tange a presença da água, com o desenvolvimento industrial e urbano esse recurso permaneceu indevidamente em segundo plano (REBOUÇAS, 2001; TUCCI; HESPANHOL; CORDEIRO NETTO, 2001).

A grande concentração populacional em litorais e capitais sobrecarregou os mananciais locais, tanto pelo uso em saneamento e consumo próprios, quanto nos processos industriais e agrônômicos. A insustentabilidade na utilização aquática e a ausência da gestão desse recurso trouxeram um cenário muito forte de poluição, escassez e doenças em todo o país, com preocupante agravamento contínuo (TUNDISI, 2008; REBOUÇAS, 2001).

Desta forma, investir na gestão hídrica e na recuperação de águas contaminadas é fundamental para que possamos prosseguir com o desenvolvimento humano, vegetal e animal, além de possibilitar um futuro mais sustentável, equilibrado e humanizado (REBOUÇAS, 2001).

Pensar em evolução humana é pensar em revolução sustentável, metodologias de produção ecológicas, produtos menos modificados, na gestão eficaz de resíduos e em biotecnologias de descontaminação e remediação para as ações humanas que agressivamente já estão consolidadas.

Uma das maneiras atuais e ecológicas existentes para se despoluir um meio aquático é a biorremediação, que tem como foco a utilização de microrganismos. Essa metodologia se enquadra perfeitamente no cenário de poluentes persistentes, denominados 'xenobióticos', uma vez que os seres vivos conseguem decompô-los com maior facilidade, adaptabilidade e de forma menos tóxica (GAYLARD; BELLINASSO; MANFIO, 2005).

Considerando o cenário aquático brasileiro e o potencial de técnicas de biorremediação, o objetivo do presente trabalho foi realizar uma revisão na literatura sobre as principais metodologias de biorremediação pesquisadas e utilizadas no Brasil nos últimos 7 anos.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Brasil e suas características geográficas

O Brasil é um dos países que possuem maior extensão territorial no mundo, com 8.516.000 km<sup>2</sup> no total. Localizado no centro da América do sul e cortado pela linha do equador, o país permanece em sua grande parte no hemisfério sul (92%). Atualmente, segundo dados estimados do IBGE (2022), a população brasileira se encontra em 215.277.160 habitantes, com projeção de crescimento de 171 novos brasileiros cada hora (TUCCI; HESPANHOL; CORDEIRO NETTO, 2001).

Sua dimensão continental faz com que uma grande variabilidade de climas se instaure no decorrer de suas terras, sendo considerado, de forma geral, um país tropical, quente e rico em vegetação (TUCCI; HESPANHOL; CORDEIRO NETTO, 2001).

O clima de um local pode ser identificado por diversos fatores, como a temperatura, precipitação, evaporação, umidade relativa, ventos e luz. Desde os primórdios, mais especificamente há 4,5 bilhões de anos, o clima se modificou inúmeras vezes na Terra, culminando em adequações fundamentais para o desenvolvimento da vida como conhecemos hoje (ROSS, 1996).

A dinâmica da atmosfera é o que regula a situação climática, sendo diretamente influenciada pela latitude, pelos fluxos zonais e pelo fluxo da energia solar. A latitude influencia a temperatura de um local devido à diferença na incidência de luz solar entre locais com alta e baixa latitude. A alta latitude é caracterizada por temperaturas amenas, já que a incidência solar se espalha por sua extensão. Em contrapartida, em espaços onde a energia da luz consegue se concentrar, temos temperaturas elevadas e baixa latitude (ROSS, 1996).

No Brasil, a baixa latitude, junto à distância do oceano, o relevo e as correntes marítimas, configura a tropicalidade do país, que possui médias anuais pluviométricas acima de 1250 mm (em 90% do território brasileiro) e a predominância do relevo planalto (ROSS, 1996).

Contudo, devido à sua extensão e imensa variedade vegetal, o clima se transforma em cada uma das 5 regiões brasileiras (Figura 1), impactando diretamente na estrutura desses locais. Na região Norte e em parte do Centro-Oeste, os climas equatoriais úmido e semiúmido são predominantes, provocando vasta quantidade de chuvas (acima de 2500 mm por ano) e temperaturas elevadas (acima de 24° C em

média). Já no restante do Centro-Oeste, em parte do Nordeste e no Sudeste, o clima é tropical, com visível alternância entre tempos secos e estações chuvosas e média de temperatura de 18° C. Dentro do domínio do Nordeste, tem-se o que é chamado de mancha semiárida, caracterizada por escassa umidade e pluviosidade irregular (abaixo de 600 mm por ano) e média térmica de 26° C. Essas condições culminam em secas intensas, desequilíbrios ambientais, possibilidades de desertificações e déficits hídricos. No Sudeste tem-se a área de planaltos e serras, onde a pluviosidade é mais intensa. Por fim, no Sul do país é predominante o clima subtropical, com precipitações regulares acima de 1250 e média térmica de 18° C por ano (ROSS, 1996).

**Figura 1. Mapa de climas no Brasil**



Fonte: IBGE. Mapa de clima do Brasil. Rio de Janeiro (2002, p. 1). 1 mapa. Escala 1:5 000 000.

A junção do clima brasileiro, do relevo e dos solos do país tornaram a biodiversidade local imensamente variada, com formações vegetais importantíssimas não só para o Brasil, mas também para o mundo. Dentre as principais destacam-se a floresta Amazônica, ocupando 40% do território, a Mata Atlântica, que teve sua extensão drasticamente reduzida por atividades humanas, o Pantanal, o cerrado, a

caatinga e a mata de araucária, que se encontra em condição de extinção (TUCCI; HESPANHOL; CORDEIRO NETTO, 2001).

## 2.2 Água no Brasil

É de conhecimento geral que o planeta Terra possui 71% de seu território preenchido por água. Sendo distribuída pelos oceanos, geleiras, bacias hidrográficas e rios, a porcentagem total de água é dividida entre 97,5% de água salgada, com um volume estimado de 1370 milhões km<sup>3</sup>, e 2,5% de água doce. Há pelo menos 1 milhão de anos, de acordo com registros históricos da geologia do planeta, a quantidade de água presente na Terra ainda é tecnicamente a mesma e o que se varia nesse espaço de tempo é o lugar onde essa água se encontra e suas condições físicas, químicas e biológicas (REBOUÇAS, 2001).

A manutenção da quantidade de água no decorrer da história é fruto do ciclo hidrológico, um movimento natural e perpétuo das águas transitando pelos estados da matéria e pelas mais diversas fontes. O dinamismo deste ciclo é o que garante que a vida na Terra seja mantida, já que a água é o principal recurso necessário à existência dos seres vivos (TUNDISI, 2003).

Este ciclo é condicionado pela energia solar, força dos ventos, força da gravidade, infiltração e pelo deslocamento das massas de água. O que acontece é que a energia solar é suficiente para incitar a evaporação das águas superficiais, oceânicas e continentais. Após evaporar, os ventos carregam a água gasosa até os continentes, onde, pela força da gravidade, ela vai precipitar em forma de chuva. Uma vez depositada na terra, a água integrará rios e bacias ou será infiltrada para dentro dos lençóis de água subterrânea, sendo eventualmente drenada para os oceanos, em um sistema naturalmente autorregulado (TUNDISI, 2003).

“Todo o ciclo de vida e os comportamentos dos organismos aquáticos são influenciados pelas propriedades físicas e químicas da água. [...] As propriedades físicas e químicas da água, particularmente as anomalias de densidade, tensão superficial e as características térmicas têm importância fundamental para organismos aquáticos que vivem no meio líquido” (TUNDISI; TUNDISI, 2016).

Embora o ciclo hidrológico assegure que a água permaneça no planeta Terra, garantindo nossa subsistência, durante esse processo ela sofre alterações em sua qualidade. Além disto, essa precipitação e drenagem não é distribuída de maneira

regular pelo mundo, ocasionando problemas como a escassez/excesso dessa substância e a ausência de sua potabilidade (TUNDISI, 2003; CUNHA *et al*, 2011).

Um fator de importância nestes processos é a presença das florestas tropicais que possuem um papel gigante no equilíbrio deste ciclo, uma vez que por meio da superfície das folhagens evaporam-se grandes quantidades de água, além das árvores contribuírem para a manutenção da temperatura e da umidade local, prevenindo evaporações excessivas e desequilíbrios hídricos (ROSS, 1996).

Segundo Tundisi e Tundisi (2016), devido a esse fluxo, toda a água do planeta se movimenta constantemente entre as reservas sólidas, líquidas e gasosas, possibilitando a manutenção dos organismos presentes na terra, a evolução humana e o abastecimento de rios, riachos, lagos e, conseqüentemente, das bacias hidrográficas. As bacias são consideradas áreas de captação natural onde desaguam diversas fontes e mananciais, que a abastecem e formam uma interconexão entre os sistemas hídricos. As atividades humanas são intrinsecamente influenciadas pela bacia hidrográfica da qual fazem parte, abrangendo áreas urbanas, de preservação, de agricultura e industriais (PORTO; PORTO, 2008).

No Brasil existem 8 grandes bacias hidrográficas: a Amazônica, do Tocantins, do São Francisco, do Paraná, do Paraguai, do Uruguai, as bacias litorâneas, as do Atlântico Norte/Nordeste, Sul/Leste e as do Sul/Sudeste (Figura 2). A disponibilidade hídrica das bacias torna o país um dos mais ricos em termos hidrográficos, com 11% da água do mundo, especialmente pela Amazônica que, em média, possui vazão de 89.000 m<sup>3</sup>/s e cobre mais da metade do território brasileiro (TUCCI; HESPANHOL; CORDEIRO NETTO, 2001).

A qualidade das águas que compõem as bacias depende das características geomorfológicas da área em que estão inseridas, da cobertura vegetal no entorno, do comportamento dos seres que fazem parte daquele ecossistema e, é claro, das ações humanas que, eventualmente, chegam até esses locais (TUCCI; HESPANHOL; CORDEIRO NETTO, 2001). De acordo com Tundisi e Tundisi (2016), os sistemas aquáticos interagem com suas bacias e seus subsistemas, influenciando e sendo influenciado pelos mecanismos químicos que ocorrem no interior dessas áreas.



**Figura 2. Bacias hidrográficas no território brasileiro**



Fonte: IBGE. Divisão Hidrográfica Nacional (2021, p. 1).

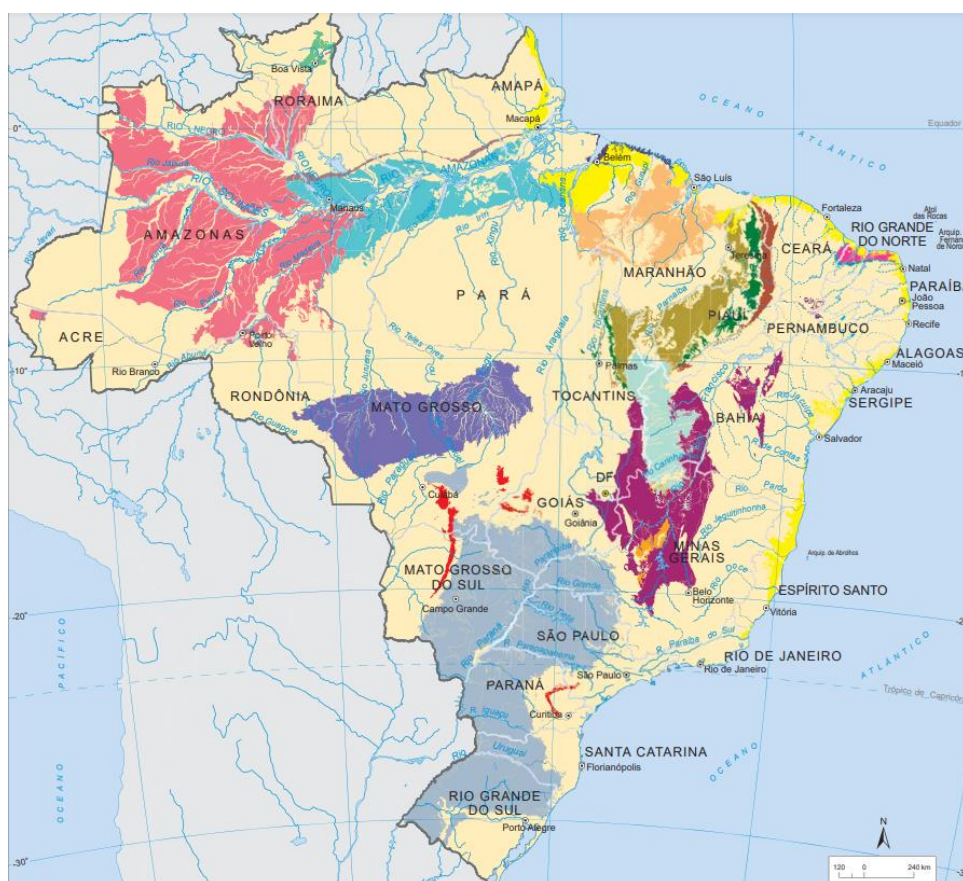
Além desta fonte de captação natural, outro recurso hídrico que faz parte do Brasil e que é um dos responsáveis pela disponibilidade aquática tal qual possuímos atualmente é a água subterrânea. As águas subterrâneas são aquelas que ocorrem abaixo da superfície da terra, em poros, fissuras ou vazios intergranulares das rochas, frequentemente armazenada em grandes quantidades na zona saturada do solo, isto é, em uma região totalmente preenchida por água. Embora faça parte do mesmo ciclo hidrológico das águas superficiais, ela possui um comportamento único e, portanto, deve-se considerar, em todos os aspectos, suas especificidades. (CUSTODIO; SILVA JUNIOR, 2008; TERRA; LÖBLER; SILVÉRIO DA SILVA, 2013; REBOUCAS, 2001).

Segundo Rebouças (2001), a elevada qualidade dessas águas se dá por estar confinada em um material relativamente menos permeável, encontrando-se, assim, melhor protegida em comparação às águas superficiais e sendo menos vulnerável à poluição externa. Sendo assim, é uma das principais fontes de água potável em

diversos estados e municípios do Brasil, representando um meio sustentável de abastecimento hídrico populacional (HIRATA; SUHOGUSOFF; FERNANDES, 2007).

Na América do Sul, a vazão de águas subterrâneas contribui com cerca de 36% do total da disponibilidade hídrica e, no Brasil, as reservas se encontram espalhadas por todo o território (Figura 3). Um aquífero depende da sua recarga por meio do ciclo hidrológico, da sua capacidade de armazenamento (quanto maior a capacidade, mais água poderá ser comportada) e do seu potencial de regularizar a estiagem dos rios (TUCCI; HESPANHOL; CORDEIRO NETTO, 2001). A parte excedente de água infiltrada desaguará nos rios e, conseqüentemente nas bacias, contribuindo para o fluxo aquático em tempos de estiagem (REBOUÇAS, 2001).

**Figura 3. Águas subterrâneas**



Fonte: IBGE. Águas subterrâneas. Rio de Janeiro (2018, p. 1).

### 2.3 Demanda hídrica, disponibilidade e gestão de recursos

Devido ao seu retorno natural aos mananciais e por ser um componente fundamental para a manutenção dos ecossistemas, a água não é e não pode ser tratada como um recurso semelhante aos outros presentes na Terra, tão pouco se

compara à uma substância qualquer. Ela é um bem da humanidade, a fonte insubstituível de toda vida na terra, a razão pela qual os ecossistemas existem e funcionam tal qual conhecemos (REBOUÇAS, 2001). Sendo assim, proteger as águas e suas fontes é primordial para garantir a subsistência humana, animal e vegetal pelos próximos séculos, uma vez que toda vida cultivada e estabelecida, independente da região, é regulada pelos recursos disponíveis no local.

Diversos são os fatores que influenciam direta e indiretamente na qualidade das águas do país e que culminam em problemas ambientais, colocando em risco esse recurso essencial.

Após a Segunda Guerra Mundial, o crescimento e desenvolvimento urbano se intensificou com os inúmeros novos investimentos nos setores de indústria, energia e agricultura. O foco dos detentores desses meios de produção, especialmente nesta época, era expandir cada vez mais seu negócio independente dos impactos ambientais posteriores, já que não havia pressão ambientalista suficiente. Desta forma, os resultados provindos desse desenvolvimento urbano e industrial foram graves, com altos índices de poluição dos rios pelos despejos domésticos e industriais (TUCCI; HESPANHOL; CORDEIRO NETTO, 2001).

Em resposta, na década de 70 iniciou-se um período de muita luta pela manutenção do meio ambiente, com foco em aproveitamento de recursos hídricos e preservação ambiental. Com este momento, diversos países formularam mecanismos para controlar os impactos de suas atividades, envolvendo não só o manejo dos produtos finais, mas o processo de aprovação, fiscalização da execução e operação como um todo. O foco principal estava na qualidade das águas dos rios, bacias e de aquíferos, na carga poluente difusa agrícola (que atinge toda a extensão do corpo de água ou solo), no desmatamento e no impacto climático da Terra (TUCCI; HESPANHOL; CORDEIRO NETTO, 2001).

Na década de 90, passou-se a definir em termos institucionais os aspectos relacionados ao gerenciamento de recursos hídricos (especialmente nas grandes metrópoles), à diminuição dos impactos de fontes difusas e ao uso correto do solo rural. Desde então, o foco na preservação ambiental e a luta pela manutenção da qualidade dos recursos naturais tem se intensificado cada vez mais (TUCCI; HESPANHOL; CORDEIRO NETTO, 2001).

Embora essa preocupação com a água e com o ambiente terrestre tenha aumentado nos últimos tempos, a progressiva urbanização, o crescente índice populacional, o aumento significativo das demandas industriais, a necessidade de expandir os aspectos relacionados a higiene sanitária e a crise climática atual fazem com que a demanda por água cresça indubitavelmente. Neste cenário, embora o Brasil possua uma disponibilidade aquática imensa, a crise hídrica tem se mostrado presente em todo o país, com altos índices de poluição por toda a extensão territorial e com supressão de água de qualidade em diversas localidades (TUNDISI, 2008).

Para prevenir situações como esta e para solucionar estes problemas, a gestão de recursos hídricos torna-se indispensável, contribuindo para impedir a poluição em massa do solo e das águas do país, além de eliminar o estresse e a escassez aquática (TUNDISI, 2008). O objetivo geral desta gestão é garantir a oferta de água de qualidade ao passo que se preservam as funções hidrológicas, biológicas e químicas dos mais diversos ecossistemas, adaptando a atividade humana à natureza e não o oposto (CUNHA, 2011).

Em concordância com Cunha (2011), o principal desafio é utilizar os recursos de maneira sustentável, isto é, de modo que no futuro ainda haja quantidade e qualidade suficiente para a população. Além disto, lidar o quanto antes com fontes poluídas e/ou afetadas de alguma forma também é um passo essencial para atingir fins de sustentabilidade.

“A gestão compreende a articulação do conjunto de ações dos diferentes agentes sociais que utilizam estes recursos, objetivando compatibilizar seu uso, o controle e a proteção desse recurso ambiental visando sempre o desenvolvimento sustentável” (CUNHA, 2011).

## **2.4 A crise hídrica brasileira**

Um dos fatores que levam o país a entrar na crise de água atual é o intenso crescimento populacional e sua densidade.

**Figura 4. Densidade populacional no Brasil em 2010**



Fonte: Fonte: IBGE. Censo Demográfico 2010. Rio de Janeiro (2010, p. 1).

É possível notar pelo mapa de densidade populacional do ano de 2010 (Figura 4) que, embora o país tenha um território amplo e com recursos fluviais bem distribuídos, a população se encontra concentrada nos litorais e extremos leste do Brasil, permanecendo distante dos principais rios e contribuindo para o aumento da demanda das bacias nestes locais (Figura 5). Essa desfavorável distribuição populacional influencia diretamente nos potenciais de água doce destes espaços, visto que, segundo Rebouças (2001), a disponibilidade não acompanha as demandas locais e a falta de água prejudica não só a população, mas todo o ecossistema existente naquele local.

**Figura 5. Balanço hídrico integrado**



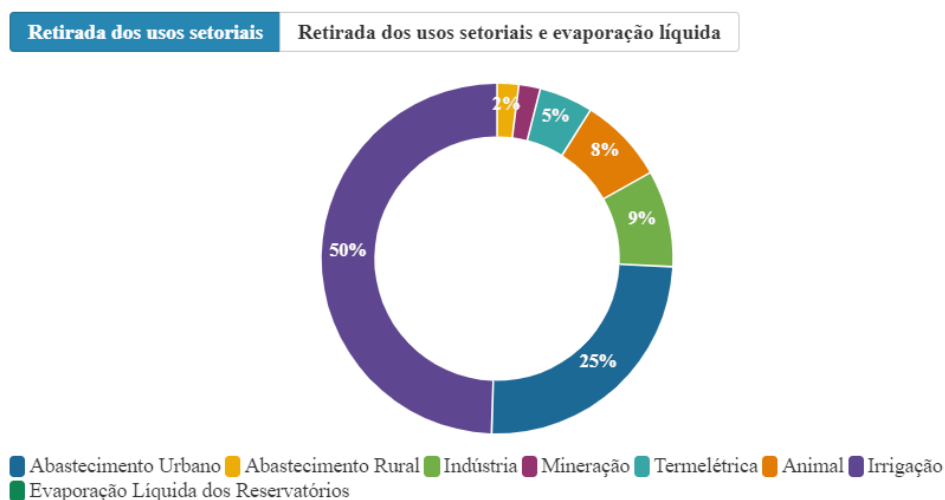
Fonte: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Balanço Hídrico Quali-Quantitativo (2022, p. 1)

Segundo Rebouças (2001), a forma mais efetiva de abastecer a população que está em constante crescimento é utilizar a água disponível de uma maneira sustentável, englobando as necessidades dos locais sem prejudicar o ambiente que está em seu entorno. É válido expor que a demanda de água no mundo cresce mais rápido que a população em si, já que se aumenta a necessidade de produzir mais alimentos e produtos, além de instaurar-se no desenvolvimento os hábitos de higiene constante. Contudo, o consumo doméstico não é o principal fator que afeta a demanda total de água no Brasil.

Estima-se que apenas 70% das águas são utilizadas para uso consuntivo, ou seja, de retirada e consumo direto, enquanto os 30% restantes são para evaporação líquida. A maior demanda aquática no Brasil se dá pelo uso na agricultura de irrigação (50%), seguido pelo uso urbano (25%). O restante é de uso industrial, para mineração e para abastecimento rural (Figura 6). O setor de irrigação é o que possui a menor

taxa de eficiência, uma vez que se ‘perde’ cerca de 50% a 70% da água no meio do processo. A projeção é de que nos próximos anos este setor siga liderando em uso devido ao seu grande potencial de expansão (com um aumento de 15% a 20% até 2040) (REBOUÇAS, 2001; ANA, 2022).

**Figura 6. Uso consuntivo da água no Brasil**



Fonte: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico • Figura atualizada em novembro de 2021.

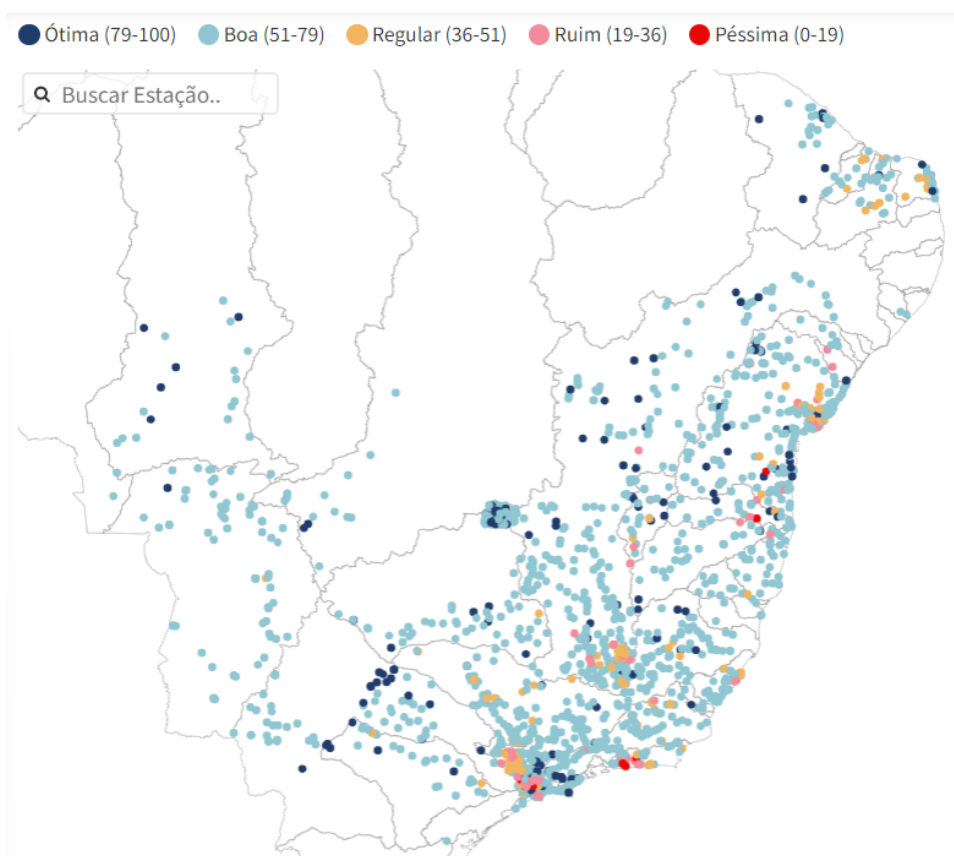
Fonte: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Usos Consuntivos Setoriais e Evaporação Líquida no Brasil (2020, p. 3)

Embora o grande consumo de água por parte dos mais diversos segmentos sociais e industriais seja um ponto chave na demanda e disponibilidade hídrica do país, o principal agravante deste cenário é a poluição direta ou indireta dessas águas, seja após o uso ou mesmo por cargas poluentes resultantes dessas ações e que venham a atingir os cursos fluviais (TUNDISI, 2008).

De acordo com Tucci, Hespagnol e Cordeiro Netto (2001), a maioria dos rios que estão próximos às grandes cidades brasileiras se encontram em situação de deterioração, visto que boa parte desses locais não possui coleta e tratamento de esgotos que comporte o imenso volume projetado por eles. Além dos esgotos, os efluentes industriais e as cargas difusas agroindustriais e urbanas são os principais poluentes que afetam drasticamente as biotas locais e todo o ecossistema vinculado a elas. Essas cargas poluentes podem ser de origem orgânica, dos quais fazem parte os dejetos humanos, animais e as matérias vegetais, e de origem inorgânica, normalmente resultantes de atividades humanas, do uso de pesticidas e agrotóxicos, de indústrias e de metais que escoam dos centros urbanos ou de atividades de mineração (TUCCI; HESPANHOL; CORDEIRO NETTO, 2001).

É possível notar a discrepância entre os cenários aquáticos das grandes metrópoles entre 2016 e 2020 por meio das imagens abaixo (Figura 7 e Figura 8). Enquanto os locais onde a concentração populacional é menor seguem com parâmetros semelhantes no decorrer dos anos, as cidades cuja densidade humana é intensa apresentam um decréscimo considerável no que tange a qualidade da água.

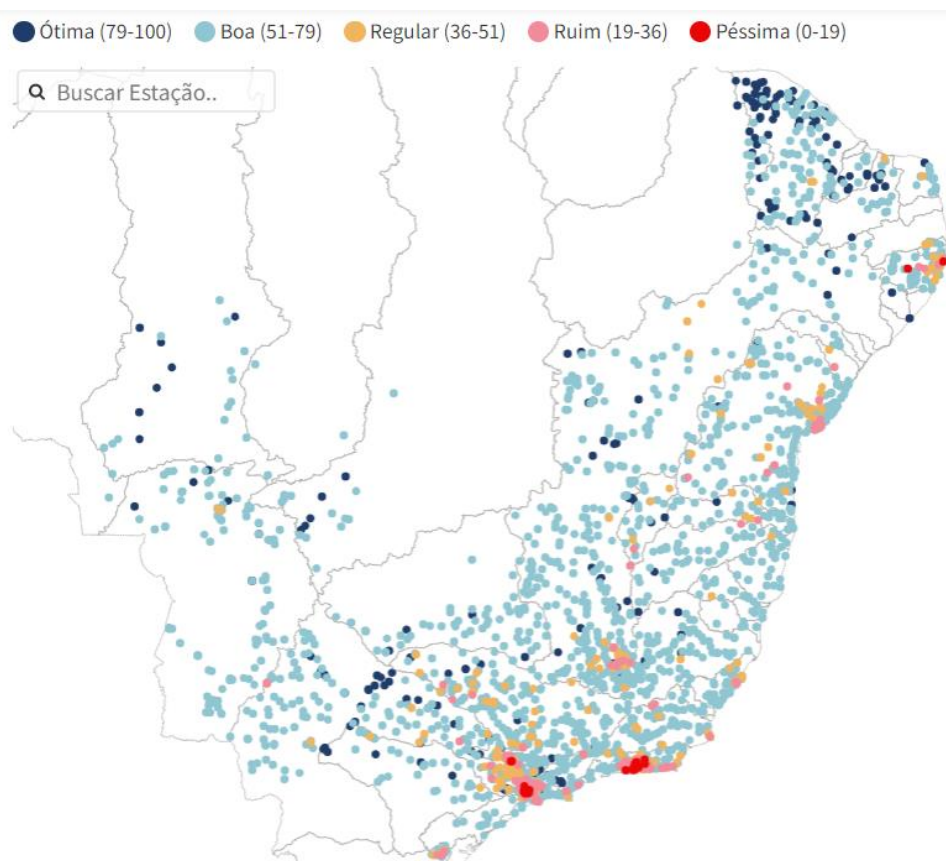
**Figura 7. Índice de Qualidade da Água em 2016**



Fonte: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Índice de Qualidade da Água (2016, p. 1).



**Figura 8. Índice de Qualidade da Água em 2020**



Fonte: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Índice de Qualidade da Água (2020, p. 1).

Nestes cenários, além de cessar a poluição, faz-se necessário todo um trabalho de revitalização dessas águas e remediação dos danos causados a elas. Essas ações são inegavelmente importantes não só pela pauta ambiental, mas também em prol das pessoas que estão nesses espaços,

Segundo Cunha (2011), a saúde humana está diretamente relacionada ao desenvolvimento da gestão dos recursos hídricos, à potabilidade, promoção de saúde, saneamento adequado e à existência de ecossistemas saudáveis.

De maneira geral, quando as dificuldades relacionadas à disponibilidade de água e poluição de mananciais se instauram em um local, são as classes de menor renda e mais marginalizadas que sofrem de maneira mais intensa, se estendendo aos pequenos produtores e comerciantes locais. Pensar em gestão hídrica é pensar em um movimento de humanização em relação aos povos diretamente dependentes desses recursos, impactando positivamente na saúde local e em seu bem-estar social (TUNDISI, 2008).

Em concordância com Rebouças (2001), quando se ultrapassa os limites da qualidade e quantidade a partir de intervenção antropológica, caracteriza-se uma situação de desequilíbrio, degradação ou escassez em níveis inimagináveis. Sendo assim, a gestão dos recursos hídricos, recuperação de mananciais por meio de métodos despoluentes, saneamento básico e o tratamento de esgotos devem ser prioridade no Brasil, caracterizando ações fundamentais para evitar e solucionar problemas ambientais, econômicos e sociais dentro da hidrologia do país (TUNDISI, 2008).

Diversos são os meios existentes para despoluir ambientes aquáticos afetados, perpassando as técnicas de tratamento de água, flotação, eletrocoagulação, fotocátalise com nanotecnologia, técnicas nucleares e técnicas ecológicas, como a fitorremediação e a biorremediação. Nos últimos anos a pesquisa científica nesse ramo evoluiu significativamente e a todo momento, como uma chama de esperança para um futuro menos escasso e com mais dignidade e direitos humanos, essas metodologias têm sido otimizadas e novas técnicas descobertas.

## **2.5 Biorremediação**

A biorremediação consiste em uma metodologia que utiliza organismos vivos para minimizar ou erradicar a presença de poluentes em águas, solos, resíduos e demais ambientes contaminados. Sendo intrinsecamente biológica e, em muitos casos, envolvendo substâncias já presentes na biota do local, a biorremediação é considerada um processo ecologicamente correto com alto grau de eficácia, especialmente para casos em que os poluentes são de difícil degradação (GAYLARD; BELLINASSO; MANFIO, 2005).

Esses poluentes persistentes nos ambientes e que dificilmente são desintegradas de maneira natural (denominadas recalcitrantes ou xenobióticas) representam um ponto chave da biorremediação. Em tempos de constante evolução industrial e tecnológica, a formação dos mais diversos compostos em meio aos mais diversos processos químicos, físicos e biológicos é algo cotidiano. Embora estejamos inseridos nessa revolução da matéria em prol da vida humana, não se pode negar a tendência artificial, tóxica e descartável dessas substâncias, culminando em quantidades indeterminadas de resíduos (lixo) persistentes.

Um exemplo muito comum disso são os plásticos. Entre os anos de 1955 e 1993 a indústria de plásticos no Brasil passou de 20 unidades espalhadas pelo país (com foco petroquímico) para quase 2 mil empresas trabalhando com esse segmento. Em 1995, o Brasil já produzia 2.662.640 toneladas de plástico por ano e teve esse valor duplicado até o fim de 2009. No cenário mundial a evolução dessa indústria foi exponencial e segue crescendo de forma contínua. Com a necessidade de conservar melhor os alimentos, diminuir custos nas produções massivas, atender a demanda do setor de embalagens (que está envolvido em praticamente toda cadeia produtiva) e dar vida às mais variadas tecnologias, o plástico, em seus múltiplos rearranjos e ramificações, se tornou um polímero amplamente utilizado (em suas mais variadas composições e estruturas) e importante na evolução da vida humana tal qual conhecemos, uma vez que sua resistência e versatilidade o fazem uma excelente matéria prima (ZANIN; MANCINI, 2015).

Contudo, esses esforços para impulsionar a nossa espécie causaram um impacto ambiental incomensurável. O plástico e seus derivados apresentam um grau de degradabilidade muito baixo e fazem parte do grupo de compostos recalcitrantes. Além de poluir por acúmulo os aterros, lixões e oceanos, interferindo e prejudicando a fauna e a flora desses locais, essa substância ainda afeta microscopicamente nosso planeta. Sob a exposição de raios UVB, as cadeias que formam o polímero vão se quebrando em tamanhos cada vez menores, fazendo com que essa substância tóxica se disperse no solo, nas águas e no ar, permanecendo nesses locais por longos períodos e sendo ingerido pelos animais e por nós (MARTIN, 2019; MOORE, 2008).

Em 2015 a quantidade de plástico existente no mundo em forma de resíduo era de 448 milhões de toneladas. Ainda que a pressão ambientalista atual seja considerável e a sustentabilidade esteja se tornando um dos focos industriais modernos, a previsão é de que essa quantidade ainda deva dobrar até 2050 (MOORE, 2008; PARKER, 2019).

Esse é o impasse que torna necessária a busca por métodos alternativos para degradar substâncias persistentes que não representem ameaças ao ecossistema.

Os processos despoluentes que envolvem a biorremediação costumam utilizar microrganismos do próprio ambiente (autóctones) ou que foram introduzidos (sendo produzidos pela natureza ou geneticamente modificados) para transformar os xenobióticos poluentes presentes em sistemas aquáticos, resultando em subprodutos

menos nocivos e com maior grau de degradabilidade (GAYLARD; BELLINASO; MANFIO, 2005).

Devido à sua estrutura menos complexa, maior potencial genético e maior adaptabilidade, o meio microbiano é o mais utilizado dentro da biorremediação. Essas características conferem uma sinergia metabólica muito específica entre as espécies que se alimentam dos substratos umas das outras, tornando a degradação de xenobióticos mais eficaz e integral (GAYLARD; BELLINASO; MANFIO, 2005).

Diversos são os fatores que influenciam no sucesso do processo de biorremediação, variando entre as condições físicas, químicas e biológicas do local. Nos parâmetros físicos, destacam-se onde o poluente está localizado (solo, água, etc.), a temperatura e a presença de luz. No que diz respeito à estrutura química do local, a composição, o pH, a umidade, a quantidade de oxigênio dissolvido e a estrutura do poluente são os principais elementos a serem considerados já que, basicamente, o ativo metabólico precisa de condições favoráveis para atuar na degradação (GAYLARD; BELLINASO; MANFIO, 2005).

“Como exemplo da influência da estrutura química na degradação de um poluente, pode-se citar a alta persistência de compostos nitroaromáticos no ambiente. Apesar de intensos esforços, ainda não foram isoladas bactérias capazes de mineralizar muitos dos nitroaromáticos produzidos pelo homem, como, por exemplo, o TNT (utilizado em explosivos) e os herbicidas orizalin e trifluralina. Os três compostos apresentam, em comum, três grupos nitro no anel aromático que dificultam sua mineralização” (GAYLARD; BELLINASO; MANFIO, 2005).

Em relação aos fatores biológicos, a principal questão se dá pela presença dos microrganismos que irão atuar como degradantes. Embora, segundo Gaylard, Bellinaso e Manfio (2005), não existam ativos metabólicos capazes de degradar sozinhos tudo aquilo que foi produzido pela humanidade no século XX e XXI, a sua ação conjunta com outras espécies e sua capacidade de se adaptar geneticamente à necessidade do ambiente tornam possível essa biodegradação. Por exemplo, quando ocorre o co-metabolismo, ou seja, a degradação parcial do xenobiótico, os compostos resultantes podem ser consumidos por outras espécies microbianas presentes naquele sistema, culminando em degradação completa.

“O co-metabolismo, aparentemente uma transformação fútil quando analisada sob a ótica de um microrganismo isolado, tem um papel

importante nas biotecnologias de remediação de sítios contaminados, pois, geralmente, nenhum microrganismo possui todas as enzimas necessárias para a metabolização completa de um xenobiótico” (GAYLARD; BELLINASO; MANFIO, 2005).

Ainda que sejam retratados de forma separada, os fatores químicos, físicos e biológicos devem ser considerados de forma indissociável nesse processo, uma vez que possuem um grau de dependência muito forte no contexto de biorremediação e que cada processo ocorre de maneira muito particular. Conforme exemplo citado por Gaylard, Bellinaso e Manfio (2005), compostos com halogênios ou carbonos quirais tornam as moléculas mais xenobióticas por dificultar a catálise enzimática. Nesses casos, rearranjar a molécula retirando esses compostos ajudaria na sua biodegradação. Quando se fala em estrutura molecular, também é importante considerar a biodisponibilidade da substância, ou seja, a facilidade que ela terá em ser absorvida pelo organismo vivo. Se a molécula não possuir polaridade compatível com as membranas celulares, dificilmente o microrganismo conseguirá metabolizá-lo. Nesses casos, a presença de um surfactante (aquele que diminui a tensão superficial) possibilita essa entrada da molécula na célula, tornando possível sua degradação (GAYLARD; BELLINASO; MANFIO, 2005).

Além desses fatores, duas outras situações costumam acontecer em processos de biorremediação: ausência de nutrientes necessários ao microrganismo no meio poluído e escassez de populações microbianas. No primeiro caso, se faz necessário adequar o meio para melhorar as taxas de sucesso no processo, inserindo nutrientes, corrigindo parâmetros químicos ou mesmo introduzindo um surfactante. Quando essa interferência é necessária, ela é considerada uma ação de bioestimulação. Já na segunda situação, para aumentar a quantidade de microrganismos degradadores são adicionados novos grupos replicados em laboratório, formando um processo conhecido como bioaugmentação (GAYLARD; BELLINASO; MANFIO, 2005).

Para implementar um processo de biorremediação, é necessário, primeiramente, caracterizar o poluente em tipo e quantidade, além de analisar toda a extensão do local poluído. É nesse momento que os testes de bioaugmentação e bioestimulação serão realizados em laboratório com o objetivo de escolher as técnicas despoluentes mais adequadas e partir para a análise *in situ* (GAYLARD; BELLINASO; MANFIO, 2005).

Embora, de forma geral, essa metodologia possua um caráter extremamente vantajoso e carregue consigo um aspecto apropriado para sistemas aquáticos que se encontram em condição de poluição de difícil reversão, muitos são os desafios e problemas que podem vir a surgir durante o processo. Pela deposição de poluentes distintos normalmente ocorrer em um local unificado e também pelas misturas de substâncias utilizadas no âmbito industrial/agrícola, um dos principais pontos de atenção quando se fala em biorremediação é a necessidade de utilizar diferentes microrganismos em um único processo. Isto se torna necessário nesses casos porque não existe atualmente um ser vivo produzido naturalmente que seja capaz de metabolizar todo tipo de composto. Sendo assim, é extremamente pertinente utilizar microrganismos específicos para cada poluente presente no local a ser remediado (GAYLARD; BELLINASSO; MANFIO, 2005).

Outro acontecimento comum se dá quando o organismo se dilui muito rapidamente nos sedimentos e no solo do local poluído, baixando drasticamente o nível desejado e esperado de biodegradação. Além disto, em muitos momentos a taxa de biorremediação pode ser baixa, resultando na necessidade de alongar o tempo do processo (GAYLARD; BELLINASSO; MANFIO, 2005).

Em todas as situações citadas, organismos geneticamente modificados (OGMs) podem ser estruturados para suprir esses problemas, seja acelerando o processo com o aumento da taxa de biorremediação, tornando-o menos aos compostos secundários do local poluído ou mesmo atribuindo a ele a capacidade de metabolizar mais de um poluente. Embora essa possa ser uma alternativa para aumentar o sucesso dessa metodologia, muitas são as controvérsias que permeiam essa discussão. Quando se pensa em modificar geneticamente um microrganismo, é necessário também considerar paralelamente sua instabilidade perante a modificação e sua imprevisibilidade. Um OGM pode vir a desequilibrar toda a biota em que foi inserido, prejudicando os seres nativos e toda sua cadeia de dependentes, o que ocasionaria um cenário de extinção massiva. Além disso, na presença de substâncias não mapeadas, o organismo pode vir a produzir toxinas e patógenos altamente prejudiciais ou mesmo tornar-se resistente a ponto de não ser possível removê-lo daquele ecossistema (GAYLARD; BELLINASSO; MANFIO, 2005).

Ainda que os estudos atuais de OGMs sejam promissores e tenham evoluído consideravelmente nos últimos anos, substituir um xenobiótico por um microrganismo

modificado geneticamente cujo impacto ambiental se desconheça não caracteriza uma alternativa plausível de despoluição. Sendo assim, a utilização dos OGMs deve ser obrigatoriamente consciente e acompanhada de estudos integrais, testes laboratoriais e projeções realistas para que sua presença seja sempre controlada e muito bem estruturada.

### **3 OBJETIVOS**

#### **3.1 Objetivos gerais**

O objetivo principal deste trabalho é realizar um levantamento bibliográfico acerca dos métodos de biorremediação que vem sendo utilizados nas águas fluviais do Brasil desde 2016 e contribuir de maneira teórica com os estudos de despoluição ecológica dos rios, com a saúde humana das pessoas que se encontram em locais impactos por poluentes e com a possível revitalização destes ecossistemas.

#### **3.2 Objetivos específicos**

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Coletar trabalhos acadêmicos relevantes escritos nos últimos 7 anos, relacionados a biorremediação de águas no Brasil.
- Analisar a metodologia utilizada e os resultados obtidos em cada um destes trabalhos.
- Evidenciar a importância das técnicas de biorremediação no âmbito da contaminação aquática.



## 4 METODOLOGIA

Segundo Raupp e Beuren (2006), uma pesquisa bibliográfica objetiva compilar conhecimentos a respeito de um problema, tornando possível uma releitura do tema e a escrita de uma monografia.

Sendo assim, de acordo com Macedo (1995), para uma pesquisa científica de cunho bibliográfico deve-se formular, em primeiro lugar, um problema de pesquisa, escolhendo e delimitando o escopo a ser abordado. Desta forma, o problema de pesquisa selecionado para este trabalho diz respeito aos métodos de despoluição aquática baseados na técnica de biorremediação que foram utilizados no Brasil desde 2016.

A metodologia utilizada neste documento é a exploratória-descritiva, caracterizada como um estudo onde se busca compreender melhor o problema e construir questões pertinentes sobre seu escopo, buscando relatar e comparar as informações e resultados obtidos nos objetos de estudo (RAUPP; BEUREN, 2006).

Os artigos e pesquisas foram coletados do site Google Acadêmico e da base de dados da Science Direct, considerando o período de 2016 à 2022 e utilizando as palavras chaves “biorremediação”, “água” e “Brasil”.

Devido ao considerável índice de publicações direcionadas à essa temática, para determinar quais delas integrariam este trabalho foi desenvolvido um sistema para caracterizar as pesquisas quanto à sua relevância. Os trabalhos relevantes deveriam satisfazer as seguintes regras: ser uma pesquisa realizada no Brasil; ter sido desenvolvida entre os anos de 2016 e 2022; possuir abordagem experimental; ter resultados conclusivos e consistentes, ou seja, que determinem de fato a eficiência ou ineficiência do método em questão; possuir caráter intrinsecamente químico.

Ao todo, na literatura foram encontrados oito trabalhos que correspondiam aos critérios de relevância estabelecidos durante o desenvolvimento desta pesquisa.

## 5 DESENVOLVIMENTO

Nesta seção, os oito trabalhos selecionados serão apresentados em ordem cronológica, partindo do trabalho mais antigo até o mais recente.

### 5.1 “Utilização de fungos na biorremediação de águas contaminadas por coliformes fecais”, de Pereira, Bockler e Simm (2016)

No artigo intitulado “Utilização de fungos na biorremediação de águas contaminadas por coliformes fecais”, o objetivo principal foi avaliar o desempenho do fungo *Stropharia rugoso-annulata* como biorremediador das águas do córrego Bezerra em Cascavel-PR. Neste local, todos os efluentes das estações de tratamento de esgoto da cidade são despejados, permanecendo altamente poluído por coliformes totais e fecais (PEREIRA, BOCKLER, SIMM, 2016).

Segundo Franck (2019), o fungo *Stropharia rugosoannulata* é um cogumelo comestível de cor vinho tinto a marrom avermelhado, comumente encontrado em lascas de madeira, jardins e locais nitrificados e com comuns aparições no sul do país. Esse fungo apresenta um bom aspecto para uso em processos de biorremediação devido à sua baixa toxicidade e seu grande potencial na decomposição de inúmeros compostos (POZDNYAKOVA, 2018; CASTELLET-ROVIRA *et al.*, 2018; STEFFEN; HATAKKA; HOFRICHTER, 2002; HAN, 2021; TAYLOR *et al.*, 2015).

No artigo, três pontos amostrais foram selecionados ao longo deste córrego e, em cada ponto, duas coletas foram realizadas em períodos distintos. Os dois primeiros pontos se encontram mais próximos à cidade, enquanto o terceiro abrange a área rural. Cada amostra foi diluída 3 vezes, com 3 repetições cada, resultando em 9 tubos de ensaio. Após testes confirmativos para a presença de coliformes fecais e totais, constatou-se que a quantidade se apresentava diferente entre os primeiros pontos e o ponto mais afastado, com índices altos e medianos respectivamente (PEREIRA, BOCKLER, SIMM, 2016).

Devido à diferença entre as coletas, fez-se necessário simular em laboratório um ambiente de curso d'água, uma vez que as amostras se modificam no ambiente. Para isso foram utilizados um tambor de 240 L, um motor de aquário para a circulação da água, 6 baldes de plásticos de 4 L cada (com tampa e fundo perfurados) e 6 cavacos de madeira estéril (que irão atuar como filtros em cada balde). O motor foi

acoplado ao tambor contendo água e fezes de cachorro diluída e o curso da água foi dividido em dois: ambos contendo 3 baldes empilhados, com um cavaco de madeira cada. No segundo curso, os cavacos foram inoculados com o fungo *Stropharia rugosoannulata* para avaliar a sua capacidade de biorremediação. As análises foram realizadas na água antes de passar pelos baldes, após passar pelos baldes estéreis sem o fungo e após a passagem pelo curso contendo o microrganismo (PEREIRA, BOCKLER, SIMM, 2016).

Antes de circular no experimento, a contaminação inicial foi de 2400 nmp/ml, para ambos coliformes de estudo. Os valores se mantiveram após a filtração pelos cavacos de madeira estéreis sem o fungo. Contudo, após o contato com o ambiente contendo os microrganismos, a contaminação por coliformes totais caiu para 1100 nmp/ml, enquanto a de coliformes fecais foi reduzida a 460 nmp/ml (PEREIRA, BOCKLER, SIMM, 2016).

Os resultados obtidos evidenciam grande potencial do fungo *Stropharia rugosoannulata* no cenário da biorremediação por coliformes, sendo um microrganismo versátil e potencialmente importante no que tangem os processos de despoluição aquática.

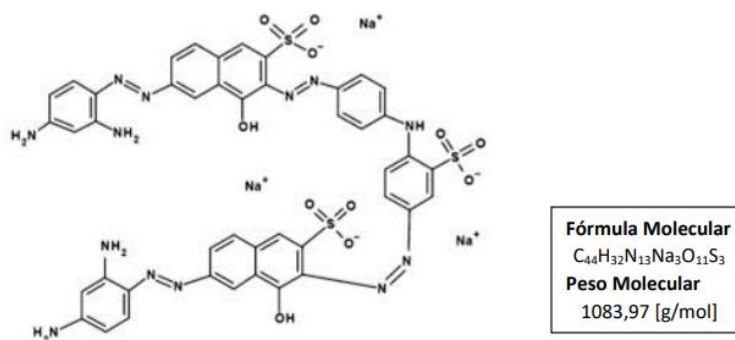
## **5.2 “Biorremediação de águas fluviais contaminadas com corantes da indústria têxtil por fungos filamentosos isolados do bioma caatinga”, de Silva (2017)**

Na dissertação intitulada “Biorremediação de águas fluviais contaminadas com corantes da indústria têxtil por fungos filamentosos isolados do bioma caatinga”, o autor Raphael Silva aborda o grandioso cenário do mercado têxtil em Pernambuco e os impactos ambientais decorrente dos constantes despejos de seus efluentes remanescentes em cursos fluviais do local (SILVA, 2017).

Os poluentes deste ramo industrial são formados, em sua maioria, por corantes e pigmentos do tipo ‘azo’, cuja característica principal é a presença de um grupo cromóforo do tipo azo (-N=N-) entre moléculas aromáticas. Essas substâncias são extremamente persistentes em meio aquático e possuem um índice elevado de recalcitrância. Além disso, devido ao grupo nitro ligado ao anel, alguns subprodutos da decomposição desses corantes são comumente aminas aromáticas, cujas tendências carcinogênica e mutagênica são altas (GONÇALVES, 2002; JONSTRUP, 2011).

Sendo assim, estudos de microrganismos que consigam metabolizar esses compostos, especialmente sem formar aminas aromáticas (denominado ‘descoloração’ devido à retirada do cromóforo), carregam uma importância imensa frente à crescente das indústrias têxteis. A base dos experimentos, então, visou analisar a ação de diversas cepas de fungos filamentosos encontrados facilmente no bioma de Pernambuco sob o corante tetra-azo Direct Black 22 (Figura 9), um dos principais empregados neste local. Após testes prévios, o autor constatou que o fungo mais promissor presente nas cepas de estudo (no que tange a descoloração do corante) é o *Aspergillus* sp UCP1279 (SILVA, 2017).

**Figura 9. Estrutura química da molécula tetra-azo Direct Black 22**

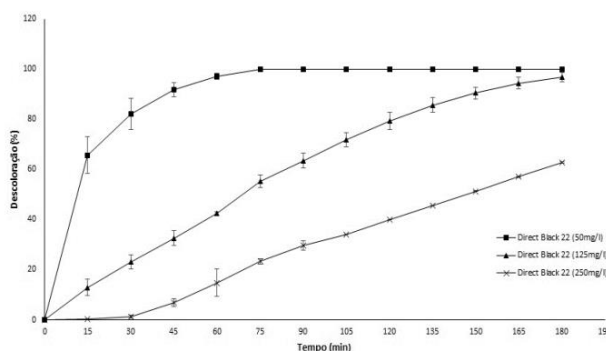


Fonte: SILVA (2017, p. 44).

A cepa foi cultivada em um meio contendo Czapek agar durante 5 dias, a uma temperatura de 30°C. Após este processo, os fungos foram inoculados em frascos contendo 80 ml de caldo glicosado e incubados por 2 dias para crescimento. No processo de biorremediação, foi adicionado 20 ml da solução do corante de estudo a cada frasco, em concentrações de 50 mg/L, 125 mg/L e 250 mg/L. Todo experimento ocorreu em triplicata, a 30°C e sob condições estáticas e de agitação (120 rpm). O tempo total do ensaio de descoloração foi de 3 horas, com análises de alíquotas realizadas a cada 10 minutos (SILVA, 2017).

Nos resultados obtidos pelo autor em condições de agitação, nos frascos que continham menores concentrações de corante (50 mg/L) a eficiência do fungo foi de 100% em 75 min, representando um índice excelente em termos de biorremediação. Nos recipientes onde a concentração de corante era maior (125 mg/L e 250 mg/L), a eficiência variou de 97% a 63% respectivamente, uma média satisfatória e muito promissora (Figura 10). Em condições estáticas os resultados foram ligeiramente menores (SILVA, 2017).

**Figura 10. Descoloração do corante azo Direct Black 22 em diferentes concentrações por *Aspergillus* sp UCP1279 sob agitação (120 rpm) à 30°C**



Fonte: SILVA (2017, p. 51).

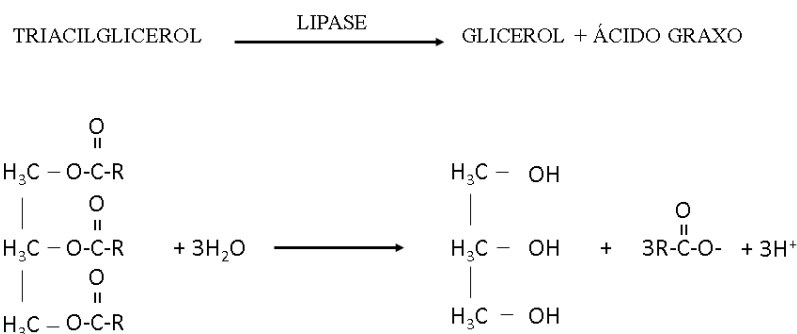
Por fim, foi testada a toxicidade das soluções antes e após o tratamento pelo fungo, para garantir que as duplas ligações dos grupos cromóforos não foram quebradas. Nesta análise, microcrustáceos de *Artemia salina* foram expostos ao corante durante 48 horas e a base do estudo foi a quantidade de larvas mortas nesse período. Nos ensaios, a toxicidade do composto antes e depois do tratamento não foi evidenciada, uma vez que o percentual de mortalidade dos microcrustáceos nas duas situações foi próxima de zero. Dessa forma, fica constatado que as aminas aromáticas não foram liberadas, representando um método de biorremediação extremamente promissor e positivo (SILVA, 2017).

### **5.3 “Biorremediação da água de biodiesel utilizando lipase fúngica de *Penicillium Sumatrense*”, de Awadallak (2018)**

Na tese intitulada “Biorremediação da água de biodiesel utilizando lipase fúngica de *Penicillium Sumatrense*” escrita por Aline Awadallak em 2018, é tratada a biodegradação de óleos e graxas em águas residuárias de lavagem de biodiesel por meio de biorremediação por lipase fúngica.

De maneira geral, as lipases são enzimas que catalisam triacilgliceróis que não são solúveis, transformando-os em ácidos graxos e gliceróis, substâncias menos nocivas ao ambiente (Figura 11). Inúmeros microrganismos possuem a capacidade de produzir lipases, sendo os fungos um de seus principais metabólitos devido à produção extracelular. Existem duas formas de produzir a lipase fúngica: fermentação submersa e fermentação em estado sólido, sendo que a segunda quase sempre apresenta um rendimento muito superior de enzimas (AWADALLAK, 2018).

**Figura 11. Reação do triacilglicerol catalisado por lipase**



Fonte: autoria própria (2021).

O biodiesel é um composto produzido pela mistura de ésteres de ácidos graxos e monoalcoóis, por meio de um processo de transesterificação. As principais matérias primas desse combustível renovável são óleos vegetais e gorduras animais, componentes de formação semelhante aos triacilgliceróis. Embora o biodiesel seja uma alternativa relativamente adequada ao uso de combustíveis completamente fósseis como a gasolina, em seu processo de purificação, onde ocorre lavagem aquosa, alguns efluentes carregados de triacilgliceróis que não reagiram na catálise são lançados no ambiente (AWADALLAK, 2018).

Embora os efluentes do biodiesel comumente sejam tratados com flotação, nesse processo há a adição de coagulantes não renováveis e/ou gasto intenso de energia (eletrocoagulação), representando pontos de melhoria em termos ambientais.

Nesse momento, utilizar lipase fúngica, conforme estudado e apontado por Awadallak (2018), pode ser uma ótima alternativa para decompor essas substâncias que restaram do processo e que podem vir a poluir os recursos fluviais, já que todo o processo é sustentável e envolvem produtos naturais.

A metodologia escolhida pela autora se baseou em utilizar uma cepa fúngica de *Penicillium sumatrense*, que foi isolada das folhas de mamona, para biorremediar os triacilgliceróis resultantes da lavagem do biodiesel. Para auxiliar nesse processo, esses fungos foram bioestimulados com a adição direta de um substrato do farelo de semente de girassol adquiridos em Toledo-PR. Foi aplicada a técnica de Fermentação no Estado Sólido (FES) e, após 168 horas, os sólidos fermentados foram congelados para cessar o crescimento fúngico e secos em estufa para que, então, pudessem ser utilizados no efluente poluído (AWADALLAK, 2018).

A água residuária da lavagem de biodiesel foi cedida por uma indústria de biodiesel da região noroeste do Paraná. O processo de biorremediação ocorreu em triplicata, utilizando 10g do sólido fermentado para 100 mL do efluente. As amostras foram agitadas por 30 dias e analisadas a cada 7 (AWADALLAK, 2018).

As características iniciais do efluente estão descritas na Tabela 1. De modo geral, a quantidade de Óleos e Graxas (O&G) e de Sólidos Totais (ST) representam o ponto de interesse nesta tese, visto que a lipase fúngica visa decompor juntamente esses aspectos nas águas residuárias.

**Tabela 1. Caracterização da água residual de lavagem de biodiesel**

Parâmetros	Unidades	Valor Médio
O&G	mg./L	16,3
TURBIDEZ	UNT	50,0
pH	-	5,74
ST	mg/L	87,5
DQO	mg de O <sub>2</sub> /L	4,18 x 10 <sup>5</sup>
DBO	mg de O <sub>2</sub> /L	4,43 x 10 <sup>5</sup>

Fonte: adaptado de AWADALLAK (2018, p. 41).

Após o processo de biorremediação, os valores de interesse foram drasticamente modificados (Tabela 2), indicando imenso grau de sucesso para essa metodologia, com uma redução de 86% no teor de óleos e graxas e 84,5% dos sólidos totais em 14 dias de análise (AWADALLAK, 2018). Ainda que os outros parâmetros tenham sido ligeiramente diminuídos ou negativamente alterados, como é o caso da Turbidez, eles se encontram dentro do padrão estabelecido pelo órgão CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) na resolução nº 430/2011 (CONAMA, 2011).

**Tabela 2. Caracterização do efluente do biodiesel após biorremediação**

Parâmetros	Unidades	Valor Médio
O&G	mg./L	2,3
TURBIDEZ	UNT	105,0
pH	-	6,0
ST	mg/L	13,0
DQO	mg de O <sub>2</sub> /L	4,40 x 10 <sup>5</sup>
DBO	mg de O <sub>2</sub> /L	5,63 x 10 <sup>5</sup>

Fonte: adaptado de AWADALLAK (2018, p. 42).

Desta forma, utilizar biorremediação a base de lipase fúngica para efluentes de biodiesel, ainda que os triacilgliceróis não sejam xenobióticos resistentes, pode ser uma alternativa eficiente de despoluição em áreas onde ocorrem esses despejos, contribuindo com os ecossistemas locais e com a manutenção da qualidade aquática desses pontos.

#### **5.4 “Isolamento de fungos com potencial para biorremediação na mina de urânio Osamu Utsumi”, de Coelho (2019)**

Na tese de Ednei Coelho (2019), o foco principal foi o isolamento de fungos para biorremediar uma mina de urânio em Minas Gerais. O autor buscou estudar esses microrganismos na expectativa de identificar potenciais decompositores deste minério e contribuir com o ambiente que o circunda.

Ainda que a contribuição econômica dessa atividade ao longo do processo evolutivo do país tenha sido importante devido ao seu potencial mineral, é muito comum se falar em insustentabilidade e impactos ambientais em um cenário de mineração. A exploração não regulamentada de recursos, a ocupação indevida de territórios protegidos e a falta de conhecimento sobre o processo em si, nos últimos 500 anos, teve e continua tendo como consequência o desmatamento de florestas nativas, erosão do solo, conflitos sociais e a contaminação da terra, das águas fluviais e dos lençóis subterrâneos que perpassam esses locais (FARIAS, 2002; FERNANDES; ARAUJO, 2016).

Desta forma, torna-se necessário reparar os danos acumulados durante esses períodos e, com a imensa gama de substâncias distintas mineradas e suas incontáveis metodologias de extração, o desafio é amplificado. Neste momento, resolver um problema de cada vez, focando em um contaminante específico e em um local cuja sua concentração é dominante configura uma prática inteligente.

No estudo de Coelho, o ambiente de estudo foi uma mina denominada Osamu Utsumi e localizada em Caldas/MG. Durante o século passado foi um dos focos da extração de octóxido de triurânio no Brasil ( $U_3O_8$ ), resultando em pilhas de rejeitos com altas concentrações de metais tóxicos, Urânio remanescente e seus isótopos instáveis. Ao reagir com a água da chuva, se inicia um processo de drenagem ácida que libera essas substâncias e contamina toda a extensão dos cursos fluviais (FAGUNDES, 2008; COELHO, 2019).

Seis locais de coleta foram estipulados para o ensaio, contabilizando um total de 20 amostras obtidas (dez do solo, seis de água e quatro de sedimentos). As amostras aquáticas foram caracterizadas por ICP OES e submetidas ao isolamento dos fungos da seguinte forma: 1 ml de cada alíquota passou por diluição seriada em água destilada até  $10^{-5}$  e foi inoculada, em triplicata, em placas de Petri com dois diferentes meios de cultura: um contendo ágar batata dextrose e outro contendo ágar



batata dextrose e ácido tartárico. Após 10 dias, os fungos foram isolados, identificados e quantificados (COELHO, 2019).

Nas análises iniciais deste caso, a concentração de Urânio no solo, água e sedimento foi identificada como 200 vezes maior que o valor máximo permitido pelo CONAMA. Com relação ao crescimento fúngico, foram identificados 57 fungos de 14 gêneros distintos, sendo predominante o *Penicillium*, caracterizado por sua habilidade de decompor compostos recalcitrantes. Dos fungos isolados, 38% apresentaram tolerância ao Urânio (COELHO, 2019).

Nos testes de biorremediação, foram preparadas biomassas vivas com caldo batata para cada fungo isolado. Em condições físico-químicas semelhantes às encontradas na mina, foram adicionadas 0,2 g de cada biomassa a frascos contendo 10 ml de uma solução de nitrato de urânio. Embora todos os 57 fungos tenham apresentado a capacidade de remover Urânio nos testes, 11 espécies foram determinadas como potenciais decompositoras do metal, sendo 5 destas altamente resistente a ele (*Gongronella butleri*, *Penicillium piscarium*, *Penicillium citrinum*, *Penicillium ludwigii*, *Talaromyces amestolkiae*) (COELHO, 2019).

Sendo assim, os estudos de Coelho representam um acervo de oportunidades promissoras no que tange a biorremediação de áreas contaminadas por Urânio.

### **5.5 “Ecotoxicidade do biossurfactante formulado de *Pseudomonas cepacia* CCT 6659 e aplicação na biorremediação de ambientes aquáticos impactados por derramamentos de óleo”, de Silva et al. (2021)**

Nos estudos de Silva *et al* (2021), denominado “Ecotoxicidade do biossurfactante formulado de *Pseudomonas cepacia* CCT 6659 e aplicação na biorremediação de ambientes aquáticos impactados por derramamentos de óleo”, a biorremediação foi pautada no uso de um biossurfactante a base da bactéria *Pseudomonas cepacia* CCT6659, fornecida pela Fundação André Tosello de Pesquisa e Tecnologia Cultura Collection, em Campinas – SP.

Basicamente, surfactantes são substâncias anfipáticas, ou seja, com uma parte polares (hidrofílica) e outra apolar (hidrofóbica). Essa característica fornece aos surfactantes a habilidade de unir substâncias que naturalmente se repelem e transformá-las em micelas. Desta forma, também são conhecidos como ‘tensoativos’ por comumente diminuírem a tensão superficial aquática e possibilitarem processos

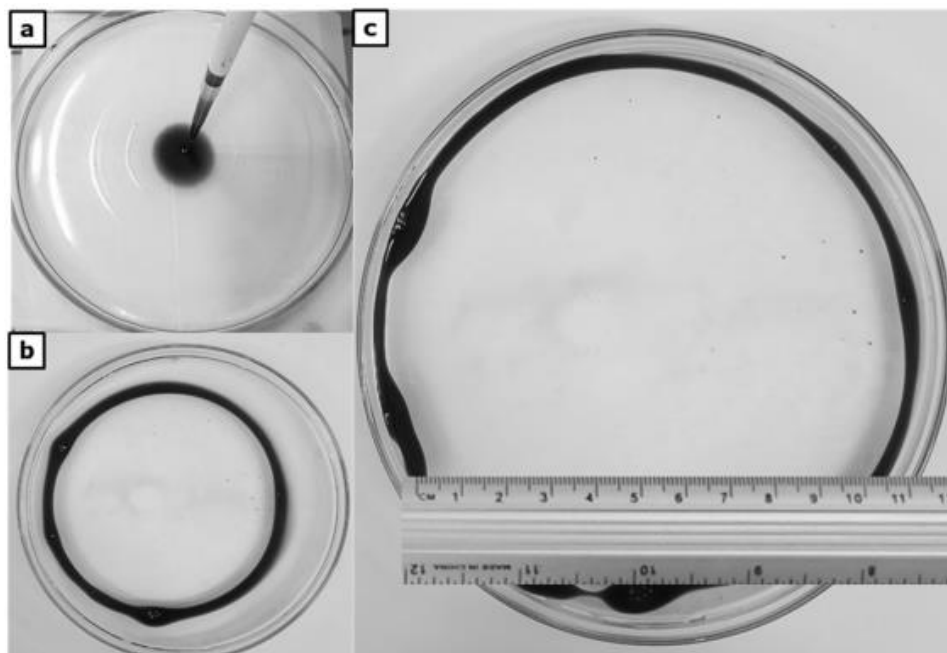
de emulsão, solubilização e detergência. A concentração mínima necessária para que uma molécula passe formar supramoléculas micelares fluidas que se solubilizam em fase aquosa é medida CMC (Concentração Micelar Crítica) (GEORGIU; LIN; SHARMA, 1992).

Os surfactantes são comumente utilizados na indústria petrolífera para a limpeza de tanques de óleo e na facilitação de seu deslocamento, além de serem o principal componente dos produtos de limpeza em geral. Devido às suas importantes aplicabilidades e ao teor tóxico de boa parte de seus componentes sintéticos, a busca por biosurfactantes tem sido cada vez mais encorajada e ampliada (SILVA *et al*, 2015). Eles podem ser utilizados no âmbito da decomposição de poluentes xenobióticos em ambientes aquáticos, uma vez que suas características físico-químicas tornam possível sua interação com o poluente e culminam em sua degradação.

Nos estudos de Silva *et al.* (2021), a produção do biosurfactante possui justamente esse aspecto de biorremediar um meio aquático, com enfoque nas águas oceânicas poluídas por petróleo. O microrganismo base deste estudo foi a bactéria *Pseudomonas cepacia* CCT6659, preparada por fermentação em um meio de cultura formado por óleo de fritura de canola obtido em um restaurante da cidade de Recife – PE e um licor de milho fornecido pela fábrica Produtos de Milho do Brasil. O CMC obtido foi de 0,06% (600 mg/L).

Os testes em laboratório com o biosurfactante foram focados em sua ação na água do mar (para dispersão e biorremediação do poluente) e em pedras marinhas (para sua lavagem). Para testar a capacidade de dispersão das manchas formadas pelo poluente, uma pequena porção de água marinha foi coletada, inserida em uma placa de Petri e contaminada com óleo de motor. O biosurfactante foi adicionado em proporções 1:2, 1:8 e 1:25 em relação ao óleo e seu potencial foi estabelecido de acordo com o diâmetro do círculo disperso na placa. Nos resultados obtidos, a dispersão ocorreu com grau de 96,0% (Figura 12), indicando alta atividade superficial e grande potencial em derramamento de óleos (SILVA *et al*, 2021).

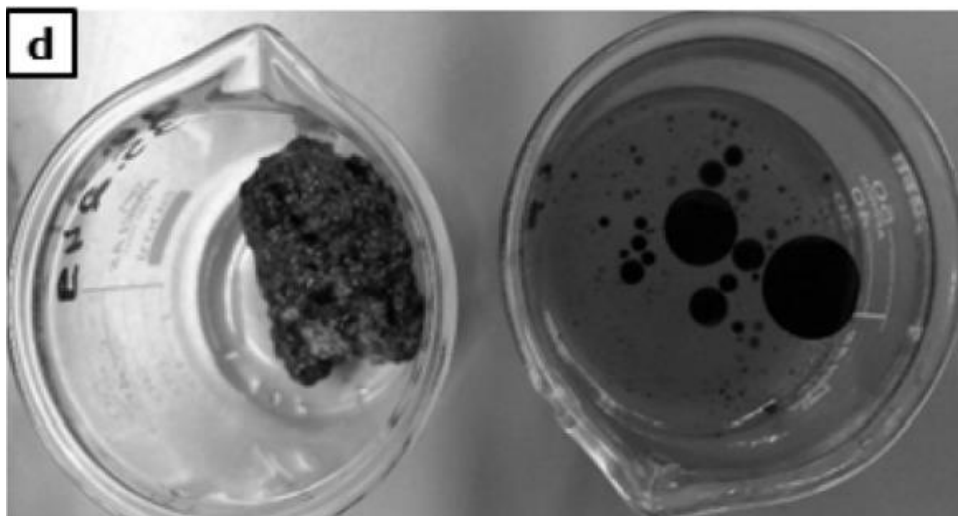
**Figura 12. Dispersão de óleo de motor em água marinha pela adição do biosurfactante de *Pseudomonas cepacia* CCT6659**



Fonte: adaptado de Silva *et al.* (2021, p. 344).

Para identificar o potencial do biosurfactante na lavagem de pedras marinhas contaminadas, algumas pedras foram coletadas na praia de Suape - PE, embebidas no poluente e submetidas a lavagem com o biosurfactante em concentrações de 0,5xCMC, 1xCMC, 2xCMC e 5xCMC. A quantidade de óleo remanescente em contraposição à quantidade absorvida pelas pedras no momento da contaminação foi identificada por meio de gravimetria. Nos resultados obtidos, cerca de 84,5% do óleo absorvido pela pedra foi removido na ação do biosurfactante (Figura 13), indicando alta viabilidade em sua aplicação como um agente para a limpeza de poluentes hidrofóbicos (SILVA *et al.*, 2021).

**Figura 13. Remoção completa de óleo de motor em pedra marinha pela adição do biosurfactante de *Pseudomonas cepacia* CCT6659.**



Fonte: adaptado de Silva *et al.* (2021, p. 341).

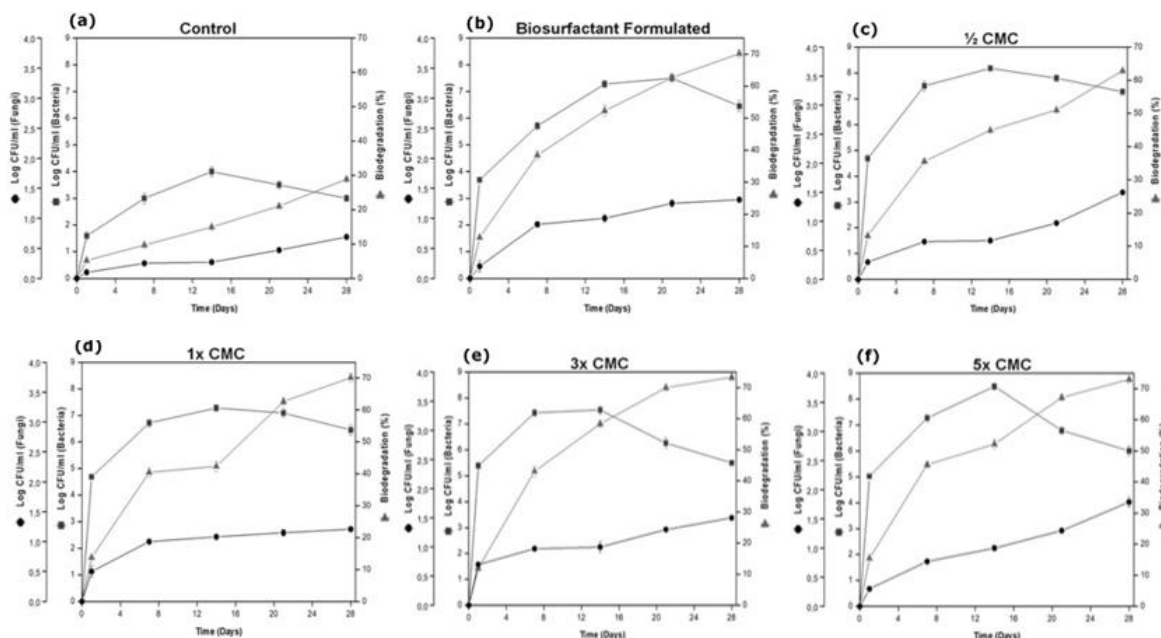
Nos testes de biorremediação, as amostras foram preparadas inserindo 100 mL da água marinha em cada Erlenmeyer e adicionando 1% de óleo de motor. Logo após, foram adicionadas soluções do biosurfactante em concentrações 0,5xCMC, 1xCMC, 2xCMC e 5xCMC, em triplicata. As amostras de controle foram preparadas da mesma maneira, com exceção da presença do biosurfactante. Os recipientes foram incubados à 28 °C e analisados a cada 4, 12, 16, 20, 24 e 28 dias. Os resultados referentes à quantidade de óleo remanescente em cada análise foram obtidos por espectrofotometria (SILVA *et al.*, 2021).

De acordo com os resultados apresentados por Silva *et al.* (2021), houve o crescimento dos microrganismos locais, aumentando assim o índice de biodegradação do óleo. Nos primeiros 14 dias as bactérias aumentaram substancialmente, diminuindo gradativamente após este período (Figura 14). A utilização do biosurfactante estimulou em média 70% da biodegradação do óleo contido nas amostras, com taxa de 63% em concentrações de 1/2 x CMC e 75% em altas concentrações (3 x CMC e 5 x CMC). Sendo assim, a capacidade deste biosurfactante de agir na biorremediação de águas afetadas por óleos semelhantes ao de motor é notável e atestada, sendo uma alternativa extremamente vantajosa e ecologicamente correta (Silva *et al.*, 2021).

Além de representar um avanço muito positivo no processo de biorremediação de mares poluídos por derramamento de óleo, por exemplo, a produção de um biosurfactante se mostra intrinsecamente promissora, visto que os surfactantes

industriais possuem baixa degradabilidade, alta toxicidade e prejudicam os meios aquáticos em que são inseridos (SILVA *et al*, 2021).

**Figura 14. Influência do biosurfactante formulado e isolado de *Pseudomonas Cepacia* CT6659 sobre o crescimento nativo na água do mar**



Fonte: adaptado de Silva *et al*, (2021, p. 345).

### 5.6 “*Aspergillus brasiliensis* - biotransformação mediada de metil p-cumarato via porção de fenilexirano: Um modelo preditivo para bioremediação ambiental”, de Conceição *et al* (2021)

No artigo de Conceição *et al* (2021), intitulado “*Aspergillus brasiliensis* - biotransformação mediada de metil p-cumarato via porção de fenilexirano: Um modelo preditivo para bioremediação ambiental”, o objetivo principal foi utilizar o fungo *Aspergillus brasiliensis* para biorremediar ambientes contaminados por compostos fenólicos, normalmente provenientes de efluentes industriais.

Os fenóis são empregados no meio industrial de forma ampla e diversa, especialmente na produção de corantes e desinfetantes. Quando em contato com o ambiente, esses compostos se dispersam rapidamente no ar, no solo e nas águas, sendo altamente recalcitrantes em meio aquático. Inúmeros são os danos que estas substâncias causam aos ecossistemas, especialmente aos humanos e animais quando inalado, ingerido ou em contato com a pele. Nesse âmbito destacam-se as doenças cardiovasculares, distúrbios gastrointestinais, problemas no trato

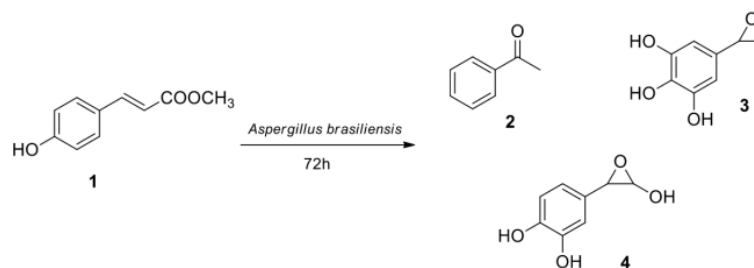
respiratório, tremores musculares, problemas de pele e morte precoce (ATSDR, 2008).

Devido ao imenso índice de fenóis descartados incorretamente no ambiente após sua aplicação industrial, faz-se necessária a busca por metodologias de decomposição e despoluição que impeçam a sua persistência. A metodologia empregada nos estudos de Conceição *et al.* (2021) envolveu o estudo da ação do fungo *Aspergillus brasiliensis* ATCC 164040 na presença do fenol metil p-cumarato, sintetizado por esterificação catalisada. O fungo de interesse foi cultivado por bioestimulação em placas de Petri contendo ágar dextrose de batata durante sete dias e as culturas foram utilizadas nos testes laboratoriais (CONCEIÇÃO *et al.*, 2021).

Para as análises, o disco contendo as culturas foi inserido em um Erlenmeyer (50 mL de meio fermentativo) e a ele foram adicionados uma solução de 5 mg do substrato de metil p-cumarato e 250 µL de sulfóxido de dimetila. Durante os testes foram utilizados 3 controles: um sem substrato, em um meio de cultura com sulfóxido de dimetila e o fungo; o segundo com o meio e o substrato, mas sem o fungo; e o último contendo apenas o meio de cultura. Os experimentos foram realizados em triplicata por 72 horas em agitação a 28 °C. As amostras foram filtradas, extraídas com acetato etílico, evaporadas sob pressão reduzida e analisadas por meio de cromatografia gasosa e de camada delgada (CONCEIÇÃO *et al.*, 2021).

Após o processo, a quantidade de fenol foi quase completamente esgotada, restando apenas 0,32% do substrato. Além disto, a reação do metil p-cumarato com o fungo possibilitou a obtenção de dois isômeros inéditos na literatura (Figura 15), tornando ainda mais relevante este estudo. Sendo assim, a biorremediação de fenóis sob catálise de *Aspergillus brasiliensis* apresentou resultados satisfatórios no que tange métodos ecologicamente corretos de decomposição desse xenobiótico, visto que a contaminação por esses compostos é frequente e essa tecnologia verde possui grande potencial de remediação (CONCEIÇÃO *et al.*, 2021).

**Figura 15. Biotransformação do metil p-cumarato pela ação do fungo *Aspergillus brasiliensis***



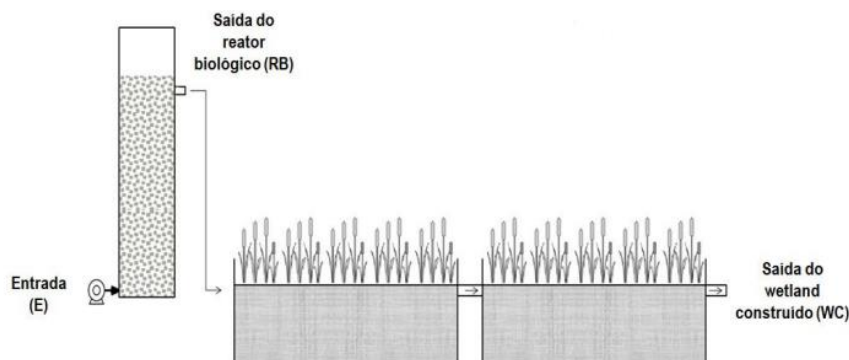
Fonte: CONCEIÇÃO *et al.* (2021, p. 4).

### 5.7 “Biorremediação de água residuária têxtil sintética em um sistema combinado constituído por reator biológico e *wetland* construído”, de Silva *et al* (2021)

No artigo intitulado “Biorremediação de água residuária têxtil sintética em um sistema combinado constituído por reator biológico e *wetland* construído” de Silva *et al.* (2021), o objeto de estudo foi a ação combinada da bactéria *Shewanella xiamenensis* G5-03 e da planta *Typha domingensis* sob o corante vermelho Congo, presente em boa parte dos processos têxteis e metabolizado ao carcinógeno benzidina (devido ao rompimento do grupo azo). Embora os *wetlands* sejam zonas que abrigam plantas aquáticas e a fitorremediação não seja o foco do presente trabalho, a união de microrganismos e plantas em processos de despoluição é extremamente promissor e pertinente.

Para esse experimento, foi construído um sistema integrado, cuja a entrada da água residuária é pelo reator biológico e a saída pelo *wetland* (Figura 16). No reator foram utilizados pedriscos para fixar as bactérias e o *wetland* foi preenchido com uma fina camada de areia e solo orgânico, água e nove exemplares da planta de interesse. Neste sistema, foram feitos testes de vazão, aclimatação e adição gradual do corante, contabilizando 20 dias de operação (SILVA *et al*, 2021).

**Figura 16. Sistema construído combinado para o tratamento de água residuária têxtil sintética.**



Fonte: SILVA *et al*, (2021, p. 678).

No experimento foram realizadas coletas periódicas em três pontos distintos (entrada do sistema, saída do reator biológico e saída do *wetland*) a cada 5 ou 6 dias, durante 66 dias. A concentração do vermelho Congo foi medida por espectrofotometria e a eficiência de decomposição foi calculada pela diferença entre a concentração inicial e a concentração final (SILVA *et al*, 2021).

A eficiência do reator biológico foi calculada em 83,0%, com desempenho total (reator + *wetland*) de 96,5%. Neste processo, a quantidade de benzidina saída do reator foi de 2,60 a 12,70 mg/L e após a passagem pelo *wetland* a variação caiu para 0 a 1,06 mg/L. Sendo assim, o processo de descoloração do vermelho Congo catalisado por *Shewanella xiamenensis* G5-03 e *Typha domingensis* se mostrou extremamente efetivo e sua união melhorou as condições de decomposição do substrato sem a formação da amina aromática (SILVA *et al*, 2021).

### **5.8 “Caracterização de bactérias resistentes a metais pesados e o potencial para biorremediação”, de Defalco (2022)**

Na tese intitulada “Caracterização de bactérias resistentes a metais pesados e o potencial para biorremediação”, a autora Thaianie Defalco objetiva estudar o potencial de remediação de microrganismos encontrados em uma amostra de sedimento estuarino contaminado com rejeitos de mineração de ferro. A principal justificativa deste estudo provém da ideia de que, se um microrganismo está presente em uma amostra que contém metal, provavelmente ele é resistente a ele e poderá vir a decompô-lo (DEFALCO, 2022).



O estuário de onde foram coletados os sedimentos fica em Linhares – ES e faz parte da Bacia Rio Doce. As amostras foram divididas em sem contaminação de rejeito, rejeito depositado sobre o sedimento e rejeito e sedimento agregados. Para o isolamento dos microrganismos, 5g de cada coleta foram diluídas em 45 ml de solução NaCl 0,8%, agitadas por 1 hora e submetidas à diluição seriada com soluções nesta mesma concentração até  $10^{-5}$ . Após isto, as amostras foram inoculadas em placas de Petri contendo TSB ágar e Nistatina. Posteriormente, foram inoculados Manganês (Mn), Zinco (Zn), Cádmio (Cd), Cobalto (Co) e cinco classes de antibióticos para caracterização da resistência (DEFALCO, 2022).

Os microrganismos isolados com sucesso foram submetidos à extração, qualificação do DNA genômico, sequenciamento e montagem genômica. No total foram 21 isolados (Tabela x), com predominância no gênero *Bacillus*, indicando forte resistência dessas populações à metais.

**Tabela 3. Microrganismos isolados e identificados.**

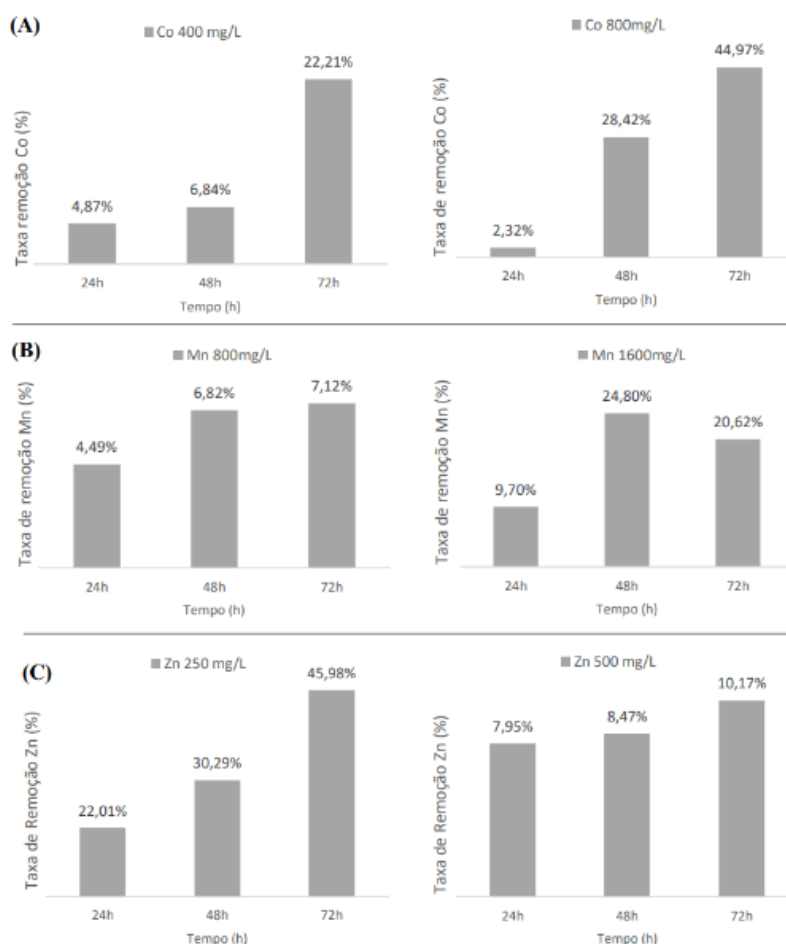
Isolados	Espécies	Código NCBI	% de identidade
S1	<i>Bacillus cereus</i>	NR_115526.1	99,71%
S2	<i>Bacillus licheniformis</i>	NR_118996.1	97,34%
S3	<i>Bacillus safensis</i>	CP010405.1	99,74%
S4	<i>Bacillus subtilis</i>	NR_102783.2	99,05%
S5	<i>Bacillus altitudinis</i>	NR_042337.1	99,87%
S6	<i>Bacillus aryabhatai</i>	MG905876.1	99,04%
S7	<i>Bacillus deserti</i>	NR_117383.1	99,56%
S8	-	-	-
S9	<i>Bacillus safensis</i>	OM049200.1	99,86%
S10	<i>Bacillus pumilus</i>	NR_112637.1	98,88%
S11	<i>Bacillus aryabhatai</i>	NR_115953.1	99,16%
S12	<i>Bacillus megaterium</i>	NR_043401.1	99,39%
S13	<i>Bacillus subtilis</i>	NR_102783.2	98,24%
S14	<i>Bacillus megaterium</i>	MN100168.1	99,15%
S15	<i>Bacillus aryabhatai</i>	NR_118442.1	99,81%
S16	<i>Bacillus velezensis</i>	NR_075005.2	99,17%
S17	<i>Bacillus megaterium</i>	NR_043401.1	99,28%
S18	<i>Bacillus megaterium</i>	NR_112636.1	99,26%
S19	<i>Mucilaginibacter</i> sp.	NR_133789.1	98,10%
S20	<i>Mucilaginibacter</i> sp.	NR_148857.1	97,61%
S21	<i>Mucilaginibacter</i> sp.	NR_148857.1	98,19%

Fonte: adaptado de DEFALCO (2022, p. 51).

Devido aos estudos prévios de outros autores indicando que *Bacillus safensis* (S3) seria um potencial decompositor de metais e após atestar essa característica por montagem de genoma, nos testes de remoção dos metais do meio de cultura, foram utilizados Zinco, Manganês e Cobalto, incubados em cepa contendo esse microrganismo (denominada 3A) por 3 dias e analisados uma vez a cada dia por ICP-OES (Espectrometria de Emissão Óptica por Plasma Acoplado Indutivamente). Em

menor concentração dos metais, a taxa de remoção foi maior para o Zinco, seguido do Cobalto e do Manganês, com remoção de 45,98%, 7,12% e 22,2% respectivamente. Já em maiores concentrações, a eficiência da remoção seguiu a sequência Cobalto > Manganês > Zinco, com remoção de 44,97%, 24,8% e 10,17% respectivamente (Figura 17).

**Figura 17. Remoção de metais pesados Co, Mn e Zn por *Bacillus safensis* 3A**



Fonte: DEFALCO (2022, p. 67).

Desta forma, os estudos de Defalco (2022) indicam promissora ação de microrganismos presentes em sedimentos contaminados por metais na remoção dos mesmos de meios aquáticos e terrosos poluídos por eles.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos artigos e teses apresentados nesse trabalho, é possível evidenciar a importante ação da biorremediação em meio aquático no Brasil, seu potencial sob os mais diversos poluentes e a imensa gama de microrganismos que podem ser empregados nesses processos.

Em todos os estudos, os fungos e bactérias utilizados demonstraram índices satisfatórios de remoção e degradação das águas contaminadas e se equipararam aos resultados previamente obtidos com metodologias menos ecológicas, indicando uma alternativa sustentável e eficiente.

Pela grande variabilidade de microrganismos que habitam os ecossistemas brasileiros, por ser uma metodologia atual e pelos inúmeros xenobióticos dispersos nos cursos fluviais, a área da biorremediação dispõe de amplo espaço para desenvolvimento de pesquisas científicas, sendo um importante tema a ser tratado de forma interdisciplinar e contextualizada nas escolas e universidades. Desta forma, além de contribuir com a melhoria da qualidade aquática no país, ela propicia ciência, consciência ambiental e humanização.

## REFERÊNCIAS

Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). **Toxicological Profile for Phenol**. US Public Health Service, US Department of health and human services. 2008. Disponível em: <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp115.pdf>. Acesso em: 02 de nov de 2022.

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil**. 2022. Disponível em: <https://relatorio-conjuntura-ana-2021.webflow.io/capitulos/usos-da-agua>. Acesso em: 26 de out de 2022.

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). **Balanco hídrico**. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/gestao-das-aguas/panorama-das-aguas/balanco-hidrico>. Acesso em: 26 de out de 2022.

AWADALLAK, A. D. *et al.* **Biorremediação da água de biodiesel utilizando lipase fúngica de *Penicillium sumatrense***. 2018. Dissertação – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2018.

CASTELLET-ROVIRA, F. *et al.* ***Stropharia rugosoannulata* and *Gymnopilus luteofolius***: Promising fungal species for pharmaceutical biodegradation in contaminated water. *Journal of environmental management*, v. 207, p. 396-404, 2018.

COELHO, E. A. A. **Isolamento de fungos com potencial para biorremediação na mina de urânio Osamu Utsumi**. 2019. Tese - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

CONCEIÇÃO, J. C. S. *et al.* *Aspergillus brasiliensis* – biotransformation of methyl p-coumarate via phenyloxiran moiety: a predictive model for environmental bioremediation. **International Biodeterioration e Biodegradation**, V. 158, p. 1 – 6. 2021.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE (CONAMA). Legislação Ambiental Federal, **Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011**.

CUNHA, A. H. *et al.* **O reúso de água no Brasil**: a importância da reutilização de água no país. *Enciclopédia Biosfera*, v. 7, n. 13, 2011.

CUSTODIO, E.; SILVA JUNIOR, G. C. da. **Conceptos básicos sobre o papel ambiental das águas subterrâneas e os efeitos da sua exploração**. *Boletín Geológico y Minero*, v. 119, p. 93-106, 2008.

DEFALCO, T. **Caracterização de bactérias resistentes a metais pesados e o potencial para biorremediação**. 2022. Dissertação - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2022.

FAGUNDES, J. R. T. **Balço hídrico do bota-fora bf4 da mina osamu otsumi, inb, como Subsídio para Projetos de Remediação de Drenagem Ácida**. Revista Brasileira de recursos hídricos, v. 13, n. 1, p. 19–28, 2008.

FARIAS, C. E. G. **Mineração e meio ambiente no Brasil**. Relatório do CGEE/PNUD, v. 76, p. 2, 2002.

FERNANDES, F. R. C.; ARAUJO, E. R. **Mineração no Brasil: crescimento econômico e conflitos ambientais**. 2016.

FRANCK, J. A. *et al.* **Macrofungos saprofíticos comestíveis da mata atlântica catarinense e aspectos relacionados à produção comercial de cogumelos**. 2019.

GAYLARD, C. C.; BELLINASSO, M. L.; MANFIO, G. P. **Aspectos biológicos e técnicas da biorremediação de xenobióticos**. Biotecnologia, Ciência e Desenvolvimento, Brasília, v. 8, n. 34, jan./jun. 2005.

GEORGIU, G.; LIN, S.; SHARMA, M. M. **Surface–active compounds from microorganisms**. Bio/technology, v. 10, n. 1, p. 60-65, 1992.

GONÇALVES, L. M. L. **As amins aromáticas no contexto da carcinogénese química**. Boletim da Sociedade Portuguesa de Química, v. 85, n. 1, p. 54-60, 2002.

HAN, M. **The Mycoremediation of Escherichia coli by Pleurotus ostreatus, Stropharia rugosoannulata, and Trametes versicolor in Contaminated Water**. Journal of the South Carolina Academy of Science, v. 19, n. 2, p. 9, 2021.

HIRATA, R.; SUHOGUSOFF, A.; FERNANDES, A. **Groundwater resources in the State of São Paulo (Brazil): The application of indicators**. Anais da Academia Brasileira de Ciências, v. 79, p. 141-152, 2007.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Censo demográfico 1991: resultados preliminares**. Rio de Janeiro, 1992.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Projeção da população do Brasil e das Unidades da Federação**. Brasil, 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/index.html>. Acesso em: 07 de nov de 2021.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **População**. 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/pt/inicio.html>. Acesso em: 27 de out de 2022.

JONSTRUP, M. *et al.* **Sequential anaerobic–aerobic treatment of azo dyes: decolourisation and amine degradability**. Desalination, v. 280, n. 1-3, p. 339-346, 2011.

MACEDO, N. D. **Iniciação à pesquisa bibliográfica**. Edições Loyola, 1995.

MOORE, C. J. **Synthetic polymers in the marine environment: a rapidly increasing, long-term threat.** Environmental research, v. 108, n. 2, p. 131-139, 2008.

MARTIN, C. **Plastic world.** 2019.

PARKER, L. **The world's plastic pollution crisis explained.** National Geographic. 2019. Disponível em: <https://www.nationalgeographic.com/environment/article/plastic-pollution>. Acesso em: 17 de out de 2022.

PEREIRA, K. K.; BÖCKLER, T. P.; SIMM, K. C. B. **Utilização de fungos na biorremediação de águas contaminadas por coliformes fecais.** Revista Thêma et Scientia, v. 6, n. 2E, 2016.

PORTO, M. F. A.; PORTO, R. L. L. **Gestão de bacias hidrográficas.** Estudos avançados, v. 22, p. 43-60, 2008.

POZDNYAKOVA, N. *et al.* **The degradative activity and adaptation potential of the litter-decomposing fungus *Stropharia rugosoannulata*.** World Journal of Microbiology and Biotechnology, v. 34, n. 9, p. 1-14, 2018.

RAUPP, F. M.; BEUREN, I. M. **Metodologia da pesquisa aplicável às ciências. Como elaborar trabalhos monográficos em contabilidade: teoria e prática.** São Paulo: Atlas, p. 76-97, 2006.

REBOUÇAS, A. C. **Água e desenvolvimento rural.** Estudos Avançados, v. 15, n. 43, p. 327-344, 2001.

ROSS, J. L. S. **Geografia do Brasil.** Edusp, 1996.

SILVA, L. A. *et al.* **Perspectivas e aplicações de agentes surfactantes.** In: Simpósio de Engenharia de Produção de Sergipe VII, 2015, São Cristóvão - Sergipe. Anais [...] São Cristóvão: Departamento de Engenharia de Produção, 2015. p. 506 - 516.

SILVA, R. L. A. **Biorremediação de águas fluviais contaminadas com corantes da indústria têxtil por fungos filamentosos isolados do bioma Caatinga.** 2017. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. Dissertação – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

SILVA, R. C. F. S. *et al.* **Production, formulation and cost estimation of a commercial biosurfactant.** Biodegradation, v. 30, n. 4, p. 191-201, 2019.

SILVA, E. R. *et al.* **Biorremediação de água residuária têxtil sintética em um sistema combinado constituído por reator biológico e wetland construído.** Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade, v. 8, n. 19, p. 675-689, 2021.

SILVA, R. C. F. S. *et al.* **Ecotoxicity of the formulated biosurfactant from *Pseudomonas cepacia* CCT 6659 and application in the bioremediation of**

**terrestrial and aquatic environments impacted by oil spills.** Process Safety and Environmental Protection, 2021. v. 154, p. 338-347.

STEFFEN, K.; HATAKKA, A.; HOFRICHTER, M. **Removal and mineralization of polycyclic aromatic hydrocarbons by litter-decomposing basidiomycetous fungi.** Applied Microbiology and Biotechnology, v. 60, n. 1, p. 212-217, 2002.

TAYLOR, A. *et al.* **Removal of Escherichia coli from synthetic stormwater using mycofiltration.** Ecological engineering, v. 78, p. 79-86, 2015.

TERRA, L. G.; LÖBLER, C. A.; SILVÉRIO DA SILVA, J. L. **Estimativa da vulnerabilidade à contaminação dos recursos hídricos subterrâneos do município de Santiago-RS.** Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, v. 10, p. 2208– 2218, 2013.

TUCCI, C. E. M.; HESPANHOL, I.; CORDEIRO NETTO, O. M. **Gestão da água no Brasil.** 2001.

TUNDISI, J. G. **Ciclo hidrológico e gerenciamento integrado.** Ciência e Cultura, v. 55, n. 4, p. 31-33, 2003.

TUNDISI, J. G. **Recursos hídricos no futuro: problemas e soluções.** Estudos avançados, v. 22, p. 7-16, 2008.

TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T. M. **Limnologia.** Oficina de textos, 2016.

ZANIN, M.; MANCINI, S. D. **Resíduos plásticos e reciclagem: aspectos gerais e tecnologia.** SciELO-EdUFSCar, 2015.

## ANEXO A - Lei n. 9.610, de 19 de fevereiro de 1998



Presidência da República  
Casa Civil  
Subchefia para Assuntos Jurídicos

### LEI Nº 9.610, DE 19 DE FEVEREIRO DE 1998<sup>1</sup>.

Altera, atualiza e consolida a legislação sobre direitos autorais e dá outras providências.

O PRESIDENTE DA REPÚBLICA Faço saber que o Congresso Nacional decreta e eu sanciono a seguinte Lei:

#### Título I - Disposições Preliminares

Art. 1º Esta Lei regula os direitos autorais, entendendo-se sob esta denominação os direitos de autor e os que lhes são conexos.

Art. 2º Os estrangeiros domiciliados no exterior gozarão da proteção assegurada nos acordos, convenções e tratados em vigor no Brasil.

Parágrafo único. Aplica-se o disposto nesta Lei aos nacionais ou pessoas domiciliadas em país que assegure aos brasileiros ou pessoas domiciliadas no Brasil a reciprocidade na proteção aos direitos autorais ou equivalentes.

Art. 3º Os direitos autorais reputam-se, para os efeitos legais, bens móveis.

Art. 4º Interpretam-se restritivamente os negócios jurídicos sobre os direitos autorais.

Art. 5º Para os efeitos desta Lei, considera-se:

I - publicação - o oferecimento de obra literária, artística ou científica ao conhecimento do público, com o consentimento do autor, ou de qualquer outro titular de direito de autor, por qualquer forma ou processo;

II - transmissão ou emissão - a difusão de sons ou de sons e imagens, por meio de ondas radioelétricas; sinais de satélite; fio, cabo ou outro condutor; meios óticos ou qualquer outro processo eletromagnético;

III - retransmissão - a emissão simultânea da transmissão de uma empresa por outra;

IV - distribuição - a colocação à disposição do público do original ou cópia de obras literárias, artísticas ou científicas, interpretações ou execuções fixadas e fonogramas, mediante a venda, locação ou qualquer outra forma de transferência de propriedade ou posse;

V - comunicação ao público - ato mediante o qual a obra é colocada ao alcance do público, por qualquer meio ou procedimento e que não consista na distribuição de exemplares;

VI - reprodução - a cópia de um ou vários exemplares de uma obra literária, artística ou científica ou de um fonograma, de qualquer forma tangível, incluindo qualquer armazenamento permanente ou temporário por meios eletrônicos ou qualquer outro meio de fixação que venha a ser desenvolvido;

VII - contrafação - a reprodução não autorizada;

VIII - obra:

a) em co-autoria - quando é criada em comum, por dois ou mais autores;

b) anônima - quando não se indica o nome do autor, por sua vontade ou por ser desconhecido;

c) pseudônima - quando o autor se oculta sob nome suposto;

d) inédita - a que não haja sido objeto de publicação;

e) póstuma - a que se publique após a morte do autor;

f) originária - a criação primígena;

g) derivada - a que, constituindo criação intelectual nova, resulta da transformação de obra originária;

h) coletiva - a criada por iniciativa, organização e responsabilidade de uma pessoa física ou jurídica, que a publica sob seu nome ou marca e que é constituída pela participação de diferentes autores, cujas contribuições se fundem numa criação autônoma;

i) audiovisual - a que resulta da fixação de imagens com ou sem som, que tenha a finalidade de criar, por meio de sua reprodução, a impressão de movimento, independentemente dos processos de sua captação, do suporte usado inicial ou posteriormente para fixá-lo, bem como dos meios utilizados para sua veiculação;

IX - fonograma - toda fixação de sons de uma execução ou interpretação ou de outros sons, ou de uma representação de sons que não seja uma fixação incluída em uma obra audiovisual;

X - editor - a pessoa física ou jurídica à qual se atribui o direito exclusivo de reprodução da obra e o dever de divulgá-la, nos limites previstos no contrato de edição;

XI - produtor - a pessoa física ou jurídica que toma a iniciativa e tem a responsabilidade econômica da primeira fixação do fonograma ou da obra audiovisual, qualquer que seja a natureza do suporte utilizado;

XII - radiodifusão - a transmissão sem fio, inclusive por satélites, de sons ou imagens e sons ou das representações desses, para recepção ao público e a transmissão de sinais codificados, quando os meios de decodificação sejam oferecidos ao público pelo organismo de radiodifusão ou com seu consentimento;

XIII - artistas intérpretes ou executantes - todos os atores, cantores, músicos, bailarinos ou outras pessoas que representem um papel, cantem, recitem, declamem, interpretem ou executem em qualquer forma obras literárias ou artísticas ou expressões do folclore.

Art. 6º Não serão de domínio da União, dos Estados, do Distrito Federal ou dos Municípios as obras por eles simplesmente subvencionadas.

<sup>1</sup> Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/19610.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19610.htm).