

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

FACULDADE DE CIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS

MATHEUS DOS SANTOS BARBOSA

**Importância dos fungos de podridão branca do gênero
Ganoderma na biodegradação e biorremediação de compostos
xenobióticos: uma revisão.**

BAURU - SP

2022

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS

MATHEUS DOS SANTOS BARBOSA

Importância dos fungos de podridão branca do gênero *Ganoderma* na biodegradação e biorremediação de compostos xenobióticos: uma revisão.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Ciências Biológicas, na Faculdade de Ciências, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” *campus* de Bauru, para a obtenção do título de Bacharel em Ciências Biológicas.

Orientadora: Profa. Dra. Marcela Rodrigues de Camargo

BAURU - SP
2022

B238i Barbosa, Matheus dos Santos

Importância dos fungos de podridão branca do gênero *Ganoderma* na biodegradação e biorremediação de compostos xenobióticos: uma revisão. / Matheus dos Santos Barbosa. -- Bauru, 2022

32 p. : tabs.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Ciências Biológicas) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências, Bauru

Orientador: Marcela Rodrigues de Camargo

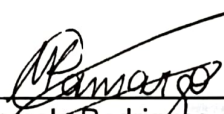
1. Microbiologia ambiental. 2. Saneamento ambiental. 3. Toxicologia. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

MATHEUS DOS SANTOS BARBOSA

Importância dos fungos de podridão branca do gênero *Ganoderma* na biodegradação e biorremediação de compostos xenobióticos: uma revisão.

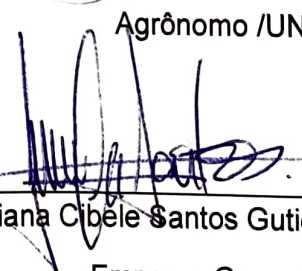
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dra. Marcela Rodrigues de Camargo
Bióloga /UNESP



Prof. Dr. Aloísio Costa Sampaio
Agrônomo /UNESP



Luciana Cibele Santos Gutierrez
Empresa Grupo Solvi

AGRADECIMENTOS

Em especial a minha Orientadora Dra. Marcela Rodrigues de Camargo, por todos os ensinamentos, incentivos, e pelo acolhimento em seu grupo de pesquisa. Te admiro muito e sou imensamente grato por ter me acompanhado e orientado durante todos esses anos de forma tão competente.

Aos meus pais Altair e Gislaine, que sempre estiveram ao meu lado me dando força, incentivo e transmitindo enorme amor e carinho. Vocês são as pessoas mais importantes para mim, e os amo imensamente, jamais conseguiria ter chegado até onde estou, e ser quem sou hoje se não fosse pela presença de vocês na minha vida. Agradeço a minha querida irmã Gabriela, por todo o carinho e amizade, e por todos os momentos felizes que passamos juntos. Meu muito obrigado a todos os meus familiares, que de diversas formas contribuem para o meu crescimento como pessoa. Sou grato ao queridíssimo Charlie, pelo amor e alegria incondicional que me transmite sempre, fazendo dos meus momentos mais belos e felizes.

Aos meus amigos e amigas, Leonardo Moreira, Matheus Sene, Gabriel Leite, Henrique Heidi, Arthur Busato, Matheus Parmegiani, Laura Chabes, Thalissa Yukie e Natalia dos Santos, por todos os momentos incríveis que vivemos juntos durante toda a graduação, vocês foram uma família para mim durante esses 4 anos e a conclusão desse curso é fruto de nossa amizade.

Sou grato a todos os professores da UNESP Bauru que contribuíram para a ampliação do meu conhecimento e senso crítico, tanto profissional quanto pessoal, vocês são maravilhosos. A todos os servidores que contribuem para a manutenção e funcionamento do nosso querido *campus*, meu muito obrigado por todos os serviços prestados.

Agradeço a UNESP por ter sido um ambiente tão acolhedor e ter me proporcionando os melhores momentos da minha vida, junto de pessoas incríveis e de oportunidade e aprendizados excelentes que somente uma Universidade Pública é capaz de conceder. Você foi e sempre será um lar para mim, tenho imenso orgulho de ser unespiano.

Dedicado

Aos meus pais, Altair e Gislaine,
e minha irmã Gabriela,

Por todo o amor, apoio e cuidado que tiveram comigo ao longo de
toda minha vida.

Aos meus amados avós

Juraci e Adailson,
Luzia e José (*in memoriam*),

Pelo imenso carinho que me deram.

Resumo

Os séculos XX e XXI trouxeram enormes avanços científicos e tecnológicos para a humanidade, permitindo um grande desenvolvimento dos centros urbanos e industriais, bem como a criação de produtos que facilitam e melhoram a qualidade de vida dos seres humanos. No entanto, atrelado a isso surgiram produtos altamente tóxicos e prejudiciais ao meio ambiente e a saúde humana, conhecidos como xenobióticos. Os xenobióticos estão presentes em diversos bens de consumo importantes como fármacos, produtos de higiene pessoal, combustíveis fósseis, cigarros, corantes, produtos de limpeza, pesticidas entre outros. Essas substâncias são capazes de alterar a qualidade das águas, solo e ar, prejudicando a biodiversidade desses ambientes e afetando a saúde dos seres que os habitam. Além disso, os xenobióticos são de difícil decomposição e altamente persistentes no meio e na cadeia alimentar. Até o momento os tratamentos existentes não se demonstram efetivos para esses compostos nas estações de tratamento de esgoto comuns, devido a esse problema é extremamente necessário o estudo de tecnologias capazes de degradar esses compostos provenientes dos centros agrícolas, urbanos e industriais. A biorremediação, uma metodologia que utiliza seres vivos como plantas, fungos e bactérias, para descontaminar ambientes, tem sido amplamente estudada no intuito de minimizar os impactos da poluição antropogênica. Fungos de podridão branca do gênero *Ganoderma* apresentam metabolismo enzimático capaz de degradar poluentes tóxicos e são resistentes ao estresse ambiental que esses compostos geram, portanto são fortes candidatos ao uso na biodegradação e biorremediação de locais contaminados por xenobióticos.

Palavras Chave: Microbiologia ambiental; Saneamento ambiental; Toxicologia.

Abstract

The 20th and 21st centuries have brought enormous scientific and technological advances to humanity, allowing a great development of urban and industrial centers, as well as the creation of products that facilitate and improve the human quality of life. However, linked to this, products that are highly toxic and harmful to the environment and human health, are known as xenobiotics. Xenobiotics are present in several important consumer goods such as pharmaceuticals, personal care products, fossil fuels, cigarettes, dyes, cleaning products, pesticides, among others. These substances can alter the quality of water, soil and air, harming biodiversity and affecting health. In addition, xenobiotics are difficult to decompose and highly persistent in the environment and the food chain. So far, the existing treatments are not effective for these compounds in common sewage treatment plants, due to this problem, the study of technologies capable of degrading these compounds from agricultural, urban and industrial centers is extremely necessary. Bioremediation, a methodology that uses living beings such as plants, fungi and bacteria to decontaminate environments, has been widely studied to minimize the impacts of anthropogenic pollution. White rot fungi of the genus *Ganoderma* use enzymatic metabolism that is capable of degrading toxic pollutants and are also resistant to the environmental stress that these compounds generate, therefore, they are strong candidates for use in the biodegradation and bioremediation of xenobiotics.

Keywords: Environmental microbiology; Environmental sanitation; Toxicology.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	10
2. OBJETIVOS	13
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	13
4. RESULTADOS	14
4.1 Degradação de compostos farmacêuticos	14
4.2 Degradação de hidrocarbonetos poliaromáticos	17
4.3 Descontaminação de efluentes domésticos e têxteis	18
4.4 Degradação de agroquímicos	20
5. DISCUSSÃO	24
6. CONCLUSÃO	27
Referências.....	28

1. INTRODUÇÃO

A partir do século XX, a expansão urbana, agrícola e industrial se intensificou. A Era da tecnologia aumentou o acesso a lugares e produtos que antes não era possível tão rapidamente, associado a isso, intensificou-se também a presença de produtos tóxicos no meio ambiente, afetando drasticamente a dinâmica dos ecossistemas, saúde humana e animal (KOUR et al., 2021; PHALE; SHARMA; GAUTAM, 2019; XIANG et al., 2021). Os bens de consumo que melhoram a qualidade de vida dos seres humanos como fármacos, produtos de higiene pessoal, agroquímicos, corantes industriais, combustíveis fósseis, hidrocarbonetos poliaromáticos (HPs) e produtos de limpeza, geraram um conforto para a sociedade, mas um problema para o meio ambiente e para a saúde pública, já que muitas dessas substâncias são persistentes no meio ambiente e podem causar danos aos seres vivos a curto, médio e longo prazo (KOUR et al., 2021; RIBEIRO, 2019; SHORE et al., 2014; STEFANAC; GRGS; DRAGICEVIC, 2021). Uma vez que podem persistir e/ou bioacumular na cadeia alimentar, essas substâncias são chamadas de xenobióticos, palavra que remete ao grego “xeno” (estranho) e “bio” (vida), ou seja, são compostos que não existem naturalmente no meio ambiente e que tem a capacidade de interagir com o metabolismo dos seres vivos de maneira nociva (GUPTA et al., 2022; STEFANAC; GRGS; DRAGICEVIC, 2021). Os principais efeitos adversos dos xenobióticos no meio ambiente são devido à toxicidade e a bioacumulação na cadeia alimentar, podendo gerar graves problemas na saúde dos seres vivos afetados, como desregulação endócrina, desativação de enzimas, câncer, teratogenicidade, infertilidade, imunossupressão entre outros (CAMARGO et al., 2017; EBELE; ABDALLAH; HARRAD, 2017; PHALE; SHARMA; GAUTAM, 2019; SHORE et al., 2014; STEFANAC; GRGS; DRAGICEVIC, 2021).

A alta persistência dos xenobióticos no meio ambiente decorre de suas características físico-químicas, como solubilidade em água, tamanho e interação molecular, e eco disponibilidade, ou seja, quando disponível no solo e na água, é de difícil remoção pelos métodos convencionais de tratamentos como lodo ativado e flotação, que visam apenas a degradação de material

orgânico (EBELE; ABDALLAH; HARRAD, 2017; KENGERSKI et al., 2020; OLIVEIRA et al., 2019; PHALE; SHARMA; GAUTAM, 2019). Os xenobióticos acabam por contaminar principalmente as águas: **1.** Através de efluentes domésticos, uma vez que estes não recebem o tratamento adequado para elimina-los nas ETEs (estações de tratamento de esgoto) convencionais; **2.** Através da lixiviação, em que a chuva carrega os contaminantes (agroquímicos) do solo para água e **3.** Pelas chuvas que precipitam também os poluentes do ar que acabam levando os contaminantes para corpos d'água de lençóis freáticos, rios e oceanos. Todos esses processos, associados à eutrofização das águas, causam enorme desequilíbrio nas comunidades aquáticas, terrestres e na saúde humana (EBELE; ABDALLAH; HARRAD, 2017; GUPTA et al., 2022; HUSSAIN et al., 2015; KOUR et al., 2021; SHORE et al., 2014). O Brasil carece de saneamento básico adequado, apenas 46% do esgoto doméstico é tratado nas ETEs, enquanto que os outros 54% são despejados diretamente no meio ambiente, causando enorme desequilíbrio ambiental (BRANCO; ALBERT; ROMÃO, 2021). A ampla utilização de produtos de higiene pessoal e fármacos tem gerados elevadas concentrações desses poluentes nas ETEs e no meio ambiente, já que eles provém do descarte inadequado por parte da população e da excreção de seus metabólitos pelo sistema de esgoto (OLIVEIRA et al., 2019). Uma gama de corantes são utilizados nas indústrias de papel, alimento e principalmente têxtil, e são altamente persistentes no meio ambiente, haja vista que são projetados para serem duradouros e resistirem a ação da água e da luz, causando enormes danos a dinâmica dos rios e oceanos (PEIXOTO; MARINHO; RODRIGUES, 2013).

Mediante os problemas que os xenobióticos geram para o saneamento ambiental e para a saúde humana, é necessário o desenvolvimento e aplicação de tecnologias eficientes e econômicas para minimizar o impacto desses contaminantes. A biorremediação, uma alternativa recentemente muito estudada pela sua forma “limpa” de atuação, consiste na utilização de organismos biológicos como plantas, fungos, algas, protozoários, bactérias e invertebrados capazes de absorver ou degradar determinado poluente, utilizando-o como fonte de carbono, nitrogênio e oxigênio, estabilizando a

saúde ambiental novamente (BABU et al., 2019; GUPTA et al., 2022; KOUR et al., 2021; MOHAPATRA; RATH; MOHAPATRA, 2018). Essa metodologia pode ser aplicada de duas formas distintas, sendo elas *in situ* ou *ex situ*, aonde na primeira o organismo é aplicado no próprio local contaminado para que ocorra o tratamento, e na segunda o contaminante é removido do ambiente e tratado em um local apropriado (BABU et al., 2019; KOUR et al., 2021). Diversos estudos evidenciam o elevado poder biodegradante e biorremediador dos fungos de podridão branca, já que esses produzem enzimas extracelulares inespecíficas como lacases, manganês peroxidase (MnP) e lignina peroxidase (LiP), capazes de degradar moléculas complexas como a lignina, celulose e hemi-celulose em moléculas simples como CO₂ e água. Além disso, o citocromo P450 presente nos fungos de podridão branca, produzem enzimas monoxigenases internas, que são muito eficientes na degradação de xenobióticos, por conta da sua capacidade de solubilizar compostos hidrofóbicos, como hidrocarbonetos poliaromáticos, pesticidas organoclorados e medicamentos (BABU et al., 2019; BANKOLE et al., 2020; NUNES; MALMLOF, 2018; VASILIADOU et al., 2016). O uso de fungos na biorremediação é pouco explorado comparado a outros microrganismos, como por exemplo as bactérias, no entanto sua aplicabilidade na remoção de poluentes é mais vantajosa por conta da maior persistência e capacidade de aclimação no meio, tolerando diversos estresses como variação de pH, temperatura e umidade (MOHAPATRA; RATH; MOHAPATRA, 2018). Dentre os fungos de podridão branca os cogumelos do gênero *Ganoderma*, conhecidos popularmente como Reishi ou Lingzhi, são mais amplamente estudados pela sua eficiência como fármacos, devido às suas propriedades antitumorais, antivirais, imunoestimulantes, anti-inflamatórias e antidiabéticas, sendo *Ganoderma lucidum* a espécie mais conhecida e utilizada do gênero (CAMARGO et al., 2022; LU et al., 2020; WANG et al., 2020;). Além de suas propriedades medicinais, *Ganoderma* spp. também é um agente biorremediador de diversos poluentes emergentes, como hidrocarbonetos aromáticos policíclicos, metais pesados e agrotóxicos, já que suas enzimas lignolíticas e seu metabolismo celular são capazes de degradar externamente e internamente tais produtos (COELHO et al., 2010; KRISHNA; PHILIP, 2005; PUNNAPAYAK et al., 2009). Devido ao potencial biorremediador e

biodegradante dos cogumelos medicinais *Ganoderma* spp. e da necessidade de se desenvolver tecnologias eficientes e seguras para minimizar os efeitos adversos de xenobióticos no meio ambiente e na saúde humana, reuniu-se artigos científicos dos últimos dez anos (entre 2012 e 2022) a respeito da capacidade descontaminante dessas espécies.

2. OBJETIVOS

O presente trabalho de conclusão de curso teve como objetivo reunir dados bibliográficos que evidenciem a capacidade descontaminante e biorremediadora dos fungos de podridão branca do gênero *Ganoderma* sob agentes xenobióticos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O levantamento bibliográfico foi obtido através de duas fontes acadêmicas, sendo elas os sites Google Acadêmico e PubMed. Foram utilizadas como palavras-chaves de pesquisa: *Ganoderma*, *Ganoderma lucidum*, *xenobiotics*, *bioremediation*, *biodegradation*, *endocrine disruptors*, e *emergents pollutants*. Foi utilizado filtragem de período durante as pesquisas sobre o potencial de *Ganoderma* como agente biorremediador entre os anos 2012 até 2022, afim de se obter resultados mais recentes sobre esse tópico, no entanto o artigo mais antigo revisado nesse trabalho foi referente ao ano de 2013. Ao todo 44 artigos acadêmicos foram utilizados para compor esse trabalho, sendo que 21 deles são a respeito do potencial biodegradante e biorremediador de *Ganoderma*, e os outros 23 serviram como base sobre a temática dos xenobióticos, ações antrópicas, fungos de podridão branca, biorremediação e saneamento ambiental.

4. RESULTADOS

4.1 Degradação de compostos farmacêuticos

A indústria farmacêutica proporciona enormes benefícios para a saúde humana e veterinária, sem ela a qualidade e a expectativa de vida seriam precárias, todavia, o despejo de medicamentos no esgoto público - derivados dos efluentes domésticos e hospitalares – grande parte das vezes não são tratados nas estações de tratamento de esgoto de forma correta (OLIVEIRA et al., 2019). Com isso, persistem no meio aquático e podem desequilibrar as comunidades, tornando as águas impróprias para a vida submersa e para o consumo animal (GUPTA et al., 2022; OLIVEIRA et al., 2019).

Em um estudo sobre a capacidade de remoção de treze fármacos em meio aquoso por *Trametes versicolor* e *Ganoderma lucidum*, Vasiliadou et al. (2016) constatou que as cepas foram capazes de remover os fármacos do sistema tanto de forma parcial, quanto de forma completa. Os experimentos foram realizados com os fungos incubados por 7 dias com cada um dos fármacos, sendo realizados tanto ensaios individuais (em que apenas uma espécie foi incubada com os fármacos para se obter resultados individuais de seu potencial biodegradante) e ensaios associados (em que as duas cepas foram incubadas juntas para degradar cada um dos treze medicamentos testados). Os resultados demonstraram que os fungos foram capazes de remover completamente os fármacos diclofenaco, gemfibrozil, ibuprofeno, progesterona e ranitidina por meio de degradação biológica, através de mecanismos oxidativos intracelulares e extracelulares. Já os medicamentos 4-acetamidoantipirina, ácido clofíbrico, atenolol, cafeína, carbamazepina, e sulpirida foram removidos predominantemente por biosorção, mecanismo que atrai e retém o poluente na superfície celular do organismo. Em associação fúngica, os treze medicamentos foram biodegradados predominantemente por ação oxidativa, indicando que a combinação de *G. lucidum* e *T. versicolor* pode ter gerado uma competição por substrato, e que consequentemente levou ao aumento da taxa de degradação dos fármacos. A ação oxidativa na biodegradação foi comprovada através da análise dos níveis das enzimas extracelulares lacases, manganês peroxidase e lignina peroxidase, onde

constatou-se que *T. versicolor* produziu predominantemente lacase, enquanto *G. lucidum* se destacou na produção de MnP, e LiP foi pouco expressa em ambas culturas. Quando associadas, as cepas produziram índices semelhantes de lacase e MnP aos do experimento individual de *G. lucidum*, indicando predominância desse sobre *T. versicolor* no sistema. Além das enzimas extracelulares, verificou-se que o citocromo P450 oxigenase participa ativamente do processo de biodegradação oxidativa por meios intracelulares nas duas cepas, já que quando foi adicionado seu inibidor, o ABT (1-aminobenzotriazol), nas culturas individuais houve diminuição na degradação dos fármacos. Ainda assim, a cultura em associação manteve alto o nível de degradação, indicando uma compensação das enzimas extracelulares quando as enzimas intracelulares são suprimidas. Por fim, os autores ainda extraíram os lipídios gerados na massa fúngica das culturas para utilização na produção de biodiesel, propondo um destino ainda mais sustentável ao lodo residual do tratamento de efluentes farmacêuticos.

Bankole et al. (2020) realizou um trabalho analisando a capacidade dos cogumelos *Ganoderma applanatum* e *Laetiporus sulphureus* na biodegradação dos anti-inflamatórios não esteroidais celocoxibe, diclofenaco e ibuprofeno. No estudo foram realizados diversos ensaios em relação à capacidade individual e associada de cada cepa na degradação dos medicamentos, tanto para os fármacos individuais, quanto em conjunto. Foi obtido que *G. applanatum* degradou cerca de 89%, 80% e 66% de celocoxibe, diclofenaco e ibuprofeno, respectivamente, e quando combinado os três anti-inflamatórios o percentual de degradação foi de apenas 61%. Já *L. sulphureus* se destacou degradando celocoxibe, diclofenaco e ibuprofeno em 92%, 87% e 79% respectivamente, e quando os fármacos foram incubados em conjunto o fungo atingiu a taxa de degradação em 73%. A associação fúngica foi muito eficiente na degradação dos fármacos, obtendo uma redução nos níveis de celocoxibe (98%), diclofenaco (96%) e ibuprofeno (95%), e na mistura dos três medicamentos resultou em 99,5% de biodegradação. Além disso, os autores analisaram a produção de enzimas ligninolíticas das cepas associadas na presença das drogas, obtendo que em 10 dias de experimento houve estímulo na produção de Lac (190%), LiP (105%) e MnP (98%) por celocoxibe, Lac (220%), LiP

(115%) e MnP (109%) por diclofenaco, Lac (198%), LiP (98%) e MnP (87%) por ibuprofeno, e a 201%, 180% e 135% de Lac, LiP e MnP pela mistura de drogas.

Yadav et al. (2022) analisou a capacidade de biodegradação dos quimioterápicos ciclofosfamida e etoposídeo utilizando os fungos de podridão branca *T. versicolor*, *Phanerochaete chrysosporium* e *G. lucidum*, constatando que nem todos foram eficientes na degradação desses fármacos. Dentre os fungos eficientes, *G. lucidum* se destacou com a capacidade de degradação e bioissorção de ciclofosfamida (71,5% e 4%, respectivamente) e de etoposídeo (98,9% e 0,7%, respectivamente).

A análise da biodegradação de metamizol sódico (popularmente conhecido como dipirona sódica) sob a ação enzimática dos fungos de podridão branca *Auricularia fuscusuccinea*, *Lentinula edodes*, *Ganoderma lucidum*, *Agrocybe aegerita*, *Pleurotus ostreatus*, *Pleurotus djamor* e *Pleurotus eryngi*, constatou que apenas *A. fuscusuccinea* foi capaz de degradar o medicamento completamente, enquanto *P. eryngi* o degradou em 96%, e os demais fungos entre 50 e 75% (MAYORGA et al., 2017). *Ganoderma lucidum* se mostrou capaz de degradar o antidepressivo venlafaxina e seu metabólito O-desmetilvenlafaxina em águas contaminadas experimentalmente, de forma que o medicamento foi degradado em 70% do volume inicial e o seu metabólito em 100% após 15 dias de incubação (LLORCA et al., 2019). *Ganoderma lucidum* foi testado como agente biodegradante dos antibióticos norfloxacino e ciprofloxacino, obtendo sucesso na degradação de norfloxacino e seus metabólitos, porém não foi capaz de degradar ciprofloxacino (CHAKRABORTHY; ABRAHAM, 2017).

Em um trabalho sobre biodegradação e bioissorção dos fármacos diclofenaco, carbamazepina, venlafaxina e iopromida em água com seis diferentes fungos (*T. versicolor*, *G. lucidum*, *Irpex lacteus*, *Stropharia rugosoannulata*, *Gymnopilus luteofolius*, *Agrocybe erebia*), verificou-se que todos os fungos foram capazes de degradar e sorver os fármacos do sistema, e foi observado que a eliminação total dos poluentes por *G. lucidum* ocorreu em 26% por bioissorção e 74% por biodegradação (LUCAS et al., 2018).

4.2 Degradação de hidrocarbonetos poliaromáticos

Os hidrocarbonetos poliaromáticos estão presentes na atmosfera e nas águas devido principalmente a queima de combustíveis fósseis como o petróleo, carvão mineral e diesel para obtenção de energia elétrica e mecânica, mas também ocorre por erupções vulcânicas, queimadas e fumaça de cigarro (BABU et al., 2019; GUPTA et al., 2022; PHALE; SHARME; GAUTAM, 2019).

Em um experimento com três diferentes cogumelos (*Agaricus bisporus*, *Pleurotus ostreatus* e *Ganoderma lucidum*) em vasos contendo solo poluído com hidrocarbonetos de petróleo, demonstrou-se que após 3 meses de tratamento houve a biodegradação do poluente por *A. bisporus* (71,5%), *P. ostreatus* (69,5%) e *G. lucidum* (57,7%), além da secreção de biosurfactantes pelos fungos - substância que facilita a dissolução e degradação do contaminante no meio – e redução da toxicidade no solo (MOHAMMADI-SICHANI et al., 2019).

Agrawal et al. (2018) observou que *Ganoderma lucidum* incubado com os hidrocarbonetos poliaromáticos fenantreno e pireno, a 27°C por 30 dias, foi capaz de degrada-los em 99,65% e 99,58% respectivamente. *Ganoderma lucidum* ainda foi capaz de aumentar as concentrações de enzimas ligninolíticas lacases, lignina peroxidase e manganês peroxidase na presença dos compostos, indicando alta capacidade de degradação dos compostos por essas enzimas.

Farradá et al. (2019) em seu trabalho sobre a análise da biodegradação de hidrocarbonetos por sete cepas do gênero *Ganoderma*, constatou que essas são capazes de degradar os compostos naftaleno, fenantreno e fluoreno. O estudo feito com a incubação dos HPAs (Hidrocarbonetos Poliaromáticos) com cepas de *Ganoderma* spp. a 27°C por 7 dias, demonstrou que as cepas de na presença dos HPAs aumentaram a produção das enzimas lacases, atingindo sua produção máxima em 74 horas, ao mesmo tempo em que houve aumento na taxa de degradação dos compostos. Todavia a presença dos HPAs não foi capaz de influenciar o aumento produtivo da enzima peroxidase

não-específica, que por não ter especificidade de substrato podem degradar diversos compostos xenobióticos. Ainda foi visto que *Ganoderma* spp. degradaram os xenobióticos principalmente pela ação enzimática, e que seus metabólitos secundários gerados são atóxicos, e podem ser absorvidos e degradados pela própria fisiologia celular dos fungos.

4.3 Descontaminação de efluentes domésticos e têxteis

Hanafiah et al. (2019) obteve que efluentes residuais domésticos sintéticos incubados com *Ganoderma lucidum* (GL) em biorreatores foram capazes de reduzir a demanda química de oxigênio (DQO) em 96%, e o nitrogênio amoniacal (NA) em 93,2%. Os experimentos foram realizados com diferentes concentrações de efluentes sintéticos, e em diferentes pHs, sendo eles 7, 5, e 4. Nesse trabalho foi constatado que *G. lucidum* (GL) se aclimatou mais rapidamente ao sistema com o pH 4,5 do que os anteriores, demonstrando que esse valor de pH é o ideal para que o fungo se adapte e cresça mais rapidamente à medida que os poluentes são degradados e adsorvidos pelas hifas. Em um estudo mais aprofundado, Hanafiah et al. (2021) avaliaram a influência do volume do inóculo de GL, temperatura, e a velocidade de agitação na capacidade degradar DQO e NA dos efluentes domésticos sintéticos. Através dos experimentos foi achado que o volume inoculado no reator com 0,25% de GL em 24 horas obteve o melhor desempenho na remoção de DQO e NA respectivamente (76,1% e 78,4%), comparado as demais concentrações de 0,00% (43,4% e 47,9%), 0,50% (93,8% e 67,2%), 0,75% (93,8% e 62,6%), 1,00% (94,5% e 65%) onde os valores da relação DQO/NA eram desiguais. Isso indica que o aumento na concentração do inóculo GL não influencia no aumento do índice de remoção dos poluentes do sistema, já que o melhor desempenho foi obtido com o menor valor de inoculação de *G. lucidum*. Analisando a influência do grau de agitação sobre o sistema constatou que em 24 horas a velocidade de 100 rpm teve melhor desempenho na remoção de DQO e Amônia, sendo essa de 92,9% e 93,8% respectivamente. Nas demais velocidades foi obtido que o percentual de remoção de DQO e NA, respectivamente, foi de: grupo controle (0 rpm) 21,0% e 5,9%, 25 rpm 93,5% 90,5%, e 50 rpm 92,0% e 86,0%. Com isso, evidencia-

se que GL apresenta melhor desempenho na degradação de poluentes em ambientes com maior agitação. Em relação a influência da temperatura no sistema, foram realizados experimentos à 25°C, 30°C, 35°C e 40°C, por 24 horas, e constatou-se que a temperatura ambiente de 25°C foi a mais eficiente na degradação de DQO (92,9%) e NA (93,8%) em um tempo relativamente curto de 15 horas. Em contrapartida à 40°C, GL degradou apenas 47,6% de DQO e 50,6% de NA em 24 horas, possivelmente essa baixa taxa de degradação ocorreu por conta da desnaturação das enzimas responsáveis pelo processo.

Shaheen et al. (2017) comprovaram que enzimas LiPs, provenientes de *G. lucidum*, aprisionadas em microesferas de alginato de cálcio e livres foram eficientes na descontaminação de cinco corantes de Sandal (Red C4BLN, Turq Blue GWF, Foron Blue E2BLN, Black CKF e Yellow Golden CRL) que são usados na indústria têxtil. No estudo comparou-se a eficácia das LiPs livres e mobilizadas, e foi visto que ambas foram eficientes na redução da DQO, biodegradação dos poluentes, e redução da citotoxicidade, no entanto as enzimas aprisionadas atingiram maiores percentuais de biorremediação em todos esses parâmetros, devido a maior reutilização da enzima no sistema e também maior estabilidade da proteína. A descoloração da água contaminada por LiP mobilizada foi de aproximadamente 80-90%, enquanto que LiP livre descoloriu em aproximadamente 48-60%. A DQO foi diminuída em aproximadamente 40-74% com LiP livre e aproximadamente 81-98% em LiP aprisionada. A análise de redução de citotoxicidade dos poluentes por LiP, através do teste de letalidade hemolítica mostrou que a os valores percentuais no efluente tratado com LiP livre foi de 15-22% aproximadamente, enquanto que no de LiP aprisionada obteve-se um valor menor e menos tóxico de aproximadamente 2-5%, enquanto que o efluente não tratado possuía entre 28-38% de citotoxicidade.

Xu et al. (2017) demonstrou que *Ganoderma lucidum* degradou quatro corantes usados na indústria têxtil, sendo eles Drimaren Blue CL-BR, Drimaren Yellow X-8GN, Drimaren Red K-4Bl e Disperse Navy Blue HGL nos respectivos percentuais 92,8%, 90,2%, 70,1% e 93,4%, em um experimento de 7 dias. O autor ainda constatou que houve elevada produção de MnP, porém pouca

expressividade das enzimas LaC e LiP. Devido à alta produtividade de MnP da cepa de *G. lucidum*, foi realizado uma clonagem do gene responsável pela expressão de MnP na espécie, denominado GluMnP1, e transferido para a levedura *Pichia pastoris* resultando no gene recombinante rGluMnP1, que foi capaz de degradar fenol e os quatro corantes do estudo com maior eficiência do que o próprio *Ganoderma*, haja visto que a levedura transformada degradou 70% dos corantes em apenas 90 minutos de experimento.

4.4 Degradação de agroquímicos

Os defensivos agrícolas são de extrema importância para a indústria alimentícia, já que sem eles a produção de alimentos seria extremamente prejudicada por pragas, e a sociedade não teria tanta disponibilidade e variedade de alimentos (GUPTA et al., 2022). No entanto, é amplamente conhecido que diversos agrotóxicos são altamente cancerígenos, mutagênicos e persistentes no meio ambiente e na cadeia alimentar, e por conta disso são poluentes que exigem muita atenção e cuidado, já que sua aplicação nas lavouras pode ser lixiviada até rios e oceanos causando enorme contaminação ambiental (GUPTA et al., 2022).

Coelho-Moreira et al. (2018) demonstrou que o *Ganoderma lucidum* é capaz de degradar o agrotóxico diuron, amplamente usado no combate a daninhas presentes nas culturas de cana, cítricos e café. Nesse estudo, constatou-se que o tratamento de culturas aquosas de diuron com *G. lucidum*, houve um aumento de 80% dos metabólitos do herbicida, indicando que houve biotransformação do produto pela ação das enzimas lignolíticas secretada pelo fungo. Também foi exposto que quando comparado ao grupo controle, o filtrado das culturas tratadas obteve uma pequena redução no índice de toxicidade do xenobiótico, decaindo do patamar de toxicidade considerado “muito alto” para o nível “alto”.

Kaur et al. (2016) constatou que o *Ganoderma lucidum* é eficaz na biodegradação do pesticida organoclorado lindano. Experimento realizados por 28 dias em meio líquido contendo 4 ppm de lindano, o fungo foi capaz de

degrada-lo em 75,50%, e produzir cerca de 50,96 U/ml de MnP, 100,13 U/ml de lacase e 17,43 U/ml de LiP. Durante o mesmo período de estudo, mas em meio sólido, a produção enzimática do fungo aumentou em relação ao meio líquido, sendo produzido 80,11 U/g de MnP, 156,82 U/g de lacase e 18,61 U/g de LiP, porém com menor taxa de degradação, resultando em uma diminuição de 37,50% do agrotóxico. Já na concentração de 40 ppm (10x maior), a degradação de lindano em meio líquido e sólido foi de 39,65% e 27,50% respectivamente, notou-se ainda que o aumento na concentração do defensivo agrícola no sistema fez com que a produção das enzimas analisadas diminuísse, indicando que lindano em altas concentrações possui capacidade inibitória na produção das enzimas fúngicas estudadas.

Ganoderma lucidum e *Trametes* sp. foram capazes de degradar e sorver o herbicida picloram, constatando-se que *G. lucidum* possui maior capacidade de biodegradação e bioissorção do agroquímico que *Trametes* sp., atingindo ainda o ponto ótimo para eliminar o poluente do sistema as condições de pH 4 e temperatura de 25°C (MACIEL et al., 2013).

Silambarasan e Abraham (2014) estudaram a cepa *Ganoderma* sp. JAS4 como agente biorremediador em solo contaminado com o inseticida clorpirifós e seu metabólito TCP (3,5,6-tricloro-2-piridinol), comprovando que o fungo foi capaz de eliminar ambas as substancias experimentalmente. Foi verificado que a cepa se adaptou muito bem ao meio, e seu crescimento foi maior na presença de clorpirifós do que em sua ausência. Quanto a taxa de degradação, *Ganoderma* sp. JAS4 foi capaz de degradar completamente clorpirifós e TCP em 24 e 72 horas, respectivamente.

Boelan et al. (2018) analisou em seu trabalho o potencial de *Ganoderma lingzhi* associado à bactéria *Bacillus subtilis* na biodegradação do inseticida DDT (1,1,1-tricloro-2,2-bis(4-clorofenil)-etano), e constatou que a co-cultura é eficaz na degradação desse composto. Ao avaliar o potencial biodegradante de *G. lingzhi* isolado, constatou-se que ele foi capaz de degradar até 52,2% de DDT em 7 dias de incubação. Em co-cultura da bactéria com o fungo, obteve-se um aumento na taxa de biodegradação de DDT de forma dose-da bactéria na cultura fúngica. Nas doses de 1, 3, 5, 7 e 10 ml de *B. subtilis*, o *Ganoderma* degradou DDT em 14,35%, 37,61%, 71,79%, 32,43% e 82,30%

respectivamente. Esse aumento na eficiência de remoção do poluente no sistema está relacionado ao potencial de secreção de biosurfactantes pela bactéria, que aumentou a dissolução de DDT (que é um composto hidrofóbico) no meio aquoso e facilitou a sua degradação, gerando metabólitos como o DDD (1,1-dicloro-2,2-bis(4-clorofenil)etano), DDMU (1-cloro-2,2-bis(4-clorofenil)etileno), e pireno. Em estudo posterior, Boelan et al. (2019) determinou que a associação de *G. lingzhi* com a bactéria *Pseudomonas aeruginosa* também foi capaz de degradar DDT e reduzi-lo a metabólitos menos tóxicos, comprovando novamente que a associação fúngica e bacteriana é eficiente na degradação desses xenobióticos. Nesse trabalho foi constatado que a taxa de degradação da cultura mista do fungo com 7 ml de *P. aeruginosa* foi de 90%, enquanto que 10 ml de bactéria degradou apenas 66%, mostrando que o excesso de bactérias no sistema atrapalha a degradação de DDT, possivelmente por gerar metabólitos tóxicos para o fungo sobreviver. Foi visto que a biotransformação de DDT por *G. lingzhi* gera DDE (1,1-(2,2-dicloroeteno-1,1-diil) bis(4-clorobenzeno), e DDD, enquanto que a de *P. aeruginosa* resulta em DDD e DDMU.

Resumidamente, na Tabela 1, podemos observar a capacidade do cogumelo medicinal *Ganoderma lucidum*, na biodegradação/remediação de ambientes contaminados, indicando que suas contribuições à saúde humana ocorrem de maneira direta (melhoria da saúde) e indireta (descontaminação).

Tabela 1 – Capacidade biodegradante e biorremediadora do cogumelo medicinal *Ganoderma lucidum* isolado ou associado, sob agentes xenobióticos.

<i>G. lucidum</i> isolado ou associado	Poluentes	Mecanismo de ação	Referências
Isolado	Hidrocarbonetos de petróleo	Biodegradação	MOHAMMADI-SICHANI et al., 2019
<i>G. lucidum</i> + <i>Trametes</i> sp.	Picloram	Biodegradação/sorção	MACIEL et al., 2013

Isolado	Picloram	Biodegradação/sorção	MACIEL et al., 2013
Isolado	Lindano	Biodegradação enzimática	KAUR et al., 2016
Isolado	Diuron	Biodegradação enzimática	COELHO-MOREIRA et al., 2018.
Isolado	Diclofenaco, carbamazepina, venlafaxina e iopromida	Biodegradação e sorção	LUCAS et al., 2018.
Isolado	Efluente doméstico sintético	Biodegradação e absorção	HANAFIAH et al., 2019/2021.
Enzimas LiP de <i>G. lucidum</i> livres e aprisionadas em alginato de cálcio	Red C4BLN; Turq Blue GWF; Foron Blue E2BLN; Black CKF; Yellow Golden CRL	Biodegradação enzimática	SHAHEEN et al., 2017.
Isolado	Fenantreno e pireno	Biodegradação enzimática	AGRAWAL et al., 2018.
Isolado	Drimaren Blue CL BR, Drimaren Yellow X-8GN, Drimaren Red K-4BI, Disperse Navy Blue HGL.	Biodegradação enzimática por MnP	XU et al., 2017.
Isolado	Venlafaxina O-desmetilvenlafaxina	Biodegradação	LLORCA et al., 2019.
Isolado	Norfloxacino	Biodegradação	CHAKRABORTHY; ABRAHAM, 2017.
Isolado	Ciclofosfamida, Etoposídeo.	Biodegradação/biossorção	YADAV et al., 2022.

Isolado	Diclofenaco, Gemfibrozil, Ibuprofeno, Progesterona, Ranitidina.	Biodegradação oxidativa	VASILIADOU et al., 2016.
Isolado	4-acetamidoantipirina, Ácido clofíbrico, Atenolol, Cafeína, Carbamazepina, Sulpirida.	Biossorção	VASILIADOU et al., 2016.
<i>Ganoderma lucidum</i> + <i>Trametes versicolor</i>	Diclofenaco, Gemfibrozil, Ibuprofeno, Progesterona, Ranitidina, 4-acetamidoantipirina, Ácido clofíbrico, Atenolol, Cafeína, Carbamazepina, Sulpirida.	Biodegradação oxidativa	VASILIADOU et al., 2016.

5. DISCUSSÃO

O ser humano gera inúmeros poluentes no meio ambiente todos os dias, sejam eles advindos da indústria, da queima de combustíveis fósseis, dos efluentes domésticos, do lixo, de insumos agrícolas e agropecuários, e que de forma visível ou invisível prejudicam os ecossistemas aquáticos e terrestres (RIBEIRO, 2019). Tais ações prejudicam tanto a saúde humana quanto a do meio ambiente devido ao desequilíbrio das comunidades, que culminam na perda da biodiversidade - essencial para o correto funcionamento dos ecossistemas (MISHRA; SINGH; SHUKLA, 2019). Os resultados desse estudo mostraram que os experimentos de biorremediação e biodegradação de compostos xenobióticos através dos fungos *Ganoderma* spp., associados ou

não a outros fungos e bactérias, foram eficientes na descontaminação desses produtos provenientes de diversos setores da sociedade.

O *Ganoderma lucidum* e *Ganoderma applanatum*, se mostraram ainda eficientes na remoção de fármacos nos experimentos relatados nesse estudo, e indicam que podem ser utilizados em ETEs para conter a contaminação medicamentosa dos efluentes domésticos e hospitalares, evitando que esses cheguem sem nenhum tratamento em rios e oceanos e afete esses ecossistemas e as comunidades que se beneficiam deles. Muitos compostos farmacêuticos como anti-inflamatórios, quimioterápicos, antibióticos, produtos de higiene pessoal e antidepressivos são capazes de desequilibrar o metabolismo dos animais, gerar resistência bacteriana, toxicidade, infertilidade e causar câncer (GUPTA et al., 2022; OLIVEIRA et al., 2019). Há indícios ainda de eventos de microevolução por poluição, fenômeno caracterizado por alterações genótípicas e fenotípicas em organismos selvagens, entre eles espécies de peixes, fazendo com que os contaminantes alterem não só a saúde dos animais, mas também interfiram na sua trajetória e potencial evolutivo (PELLETIER; COLTMAN, 2018).

Da mesma forma, foi visto que *Ganoderma* spp. foi capaz de biodegradar hidrocarbonetos poliaromáticos (compostos hidrofóbicos), tanto no solo quanto na água, demonstrando que sua aplicabilidade como biorremediador em ambientes contaminados por hidrocarbontos é promissora e pode ser útil ao saneamento ambiental. Tais substâncias são insolúveis em água devido a seus inúmeros anéis aromáticos, e portanto persistem no solo, na água, e se acumulam nos lipídios dos animais gerando bioacumulação trófica, sendo consideradas altamente tóxicas devido sua ação cancerígena e mutagênica (BABU et al., 2019; GUPTA et al., 2022).

A água é um recurso indispensável para a vida de qualquer ser vivo, principalmente para aqueles que vivem imersos nas águas como peixes, e espécies de anfíbios, algas, bactérias, crustáceos entre outros. No entanto o despejo de nutrientes provenientes de esgoto não tratado (rico em matéria orgânica), com excesso de produtos nitrogenados e fosforados, ou corantes que impedem a luz solar de entrar no fundo das águas, podem ocasionar o fenômeno da eutrofização nos corpos d'água, culminando na morte dos seres

vivos que ali residem devido a hipóxia (NAZARI-SHARABIAN; AHMED; KARAKOUZIAN, 2018). *Ganoderma lucidum* se mostrou eficiente na biodegradação e biorremediação em biorreatores contendo efluente domésticos sintéticos, diminuindo a demanda química de oxigênio e compostos nitrogenados do meio, bem como degradando os corantes da indústria têxtil, dessa forma o fungo se mostra eficaz no combate a toxicidade e perda de oxigenação nos corpos aquáticos, indicando ser capaz de prevenir o fenômeno da eutrofização aquática, principalmente em países com o saneamento básico precário, como é o caso do Brasil (BRANCO; ALBERT; ROMÃO, 2021).

Neste mesmo cenário, encontrou-se que o *Ganoderma* spp. foram capazes de biodegradar diversos agrotóxicos como DDT, diuron, clorpirifós, lindano e picloram, indicando fortemente seu o possível uso na biorremediação de locais contaminados por esses compostos (BOELAN et al., 2018; BOELAN et al., 2019; COELHO-MOREIRA et al., 2018; KAUR et al., 2016; MACIEL et al., 2013; SILAMBARASAN; ABRAHAM, 2014).

De forma geral, os xenobióticos estão presentes no solo, no ar e principalmente nas águas, como destino final dessa contaminação. Portanto, com tudo que foi exposto nesse trabalho, pode se dizer que os esforços dos cientistas devem se voltar principalmente nas estações de tratamento de esgoto, para que essas sejam capazes de tratar de forma específica esses poluentes. O emprego de fungos de podridão branca como *Ganoderma* spp. associados a outros microrganismos podem formar um sistema muito eficiente para tratar os compostos xenobióticos, e também melhorar a eficiência tanto do tratamento do esgoto doméstico comum, quanto de empresas geradoras desses poluentes. Dessa forma pode ser possível minimizar os problemas causados por esses poluentes tão presentes na sociedade e no meio ambiente.

6. CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos pelos autores nos últimos 10 anos, percebe-se que os cogumelos *Ganoderma* spp. são espécies muito promissoras na aplicação de tratamentos sanitários de poluentes emergentes como os xenobióticos. O metabolismo desses seres necessita ser amplamente esclarecido para que possa ser desenvolvida soluções biotecnológicas capazes de suprir a demanda sanitária do século XXI - e dos próximos séculos que virão - já que o ser humano vem criando diversos compostos em uma velocidade muito alta para suprir suas necessidades. Desta forma, após a elucidação a respeito de como o *Ganoderma* age nos poluentes xenobióticos, e quais são suas principais aplicações e limitações, a ciência deve buscar programar essas tecnologias ao saneamento ambiental, para que seja possível despoluir os ecossistemas e tratar os resíduos gerados pela sociedade de forma eficiente e segura, a fim de se preservar tanto a saúde humana como a biodiversidade do planeta que se encontra ameaçada pelas ações antrópicas.

Referências

AGRAWAL, N.; VERMA, P.; SHAHI, S. K. Degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons (phenanthrene and pyrene) by the ligninolytic fungi *Ganoderma lucidum* isolated from the hardwood stump. **Bioresources and Bioprocessing**, v. 5, n. 11, 2018.

BABU, A. G. et al. Bioremediation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs): Current Practices and Outlook. **Microbial Metabolism of Xenobiotic Compounds**, v. 10, p. 189-216, 2019.

BANKOLE, P. O. et al. Novel cobiomass degradation of NSAIDs by two wood rot fungi, *Ganoderma applanatum* and *Laetiporus sulphureus*: Ligninolytic enzymes induction, isotherm and kinetic studies. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 203, 2020.

BOELAN, E. G.; PURNOMO, A. S. Abilities of Co-Cultures of White-Rot Fungus *Ganoderma lingzhi* and Bacteria *Bacillus subtilis* on Biodegradation DDT. **Journal of Physics**, v. 1095, n. 1, 2018.

BOELAN, E. G.; PURNOMO, A. S. Biodegradation of 1,1,1-Trichloro-2,2-bis (4-chlorophenyl) ethane (DDT) by Mixed Cultures of White-Rot Fungus *Ganoderma lingzhi* and Bacterium *Pseudomonas aeruginosa*. **Hayati Journal of Biosciences**, v. 26, n. 2, 2019.

BRANCO, N. M. C.; ALBERT, A. L. M.; ROMÃO, C. M. C. P. A. Poluentes emergentes: Antimicrobianos no ambiente, a educação ambiental e o aspecto regulatório nacional e internacional. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 8, 2021.

CAMARGO, M. R. et al. *Ganoderma lucidum* polysaccharides inhibit *in vitro* tumorigenesis, cancer stem cell properties and epithelial-mesenchymal transition in oral squamous cell carcinoma. **Journal of Ethnopharmacology**, v. 286, 2022.

CAMARGO, M. R. et al. Pesticide dichorvos induces early solid Ehrlich tumoral development associated with a non-protective pro-inflammatory response. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, n. 4, 2017.

CHAKRABORTY, P.; ABRAHAM, J. Comparative study on degradation of norfloxacin and ciprofloxacin by *Ganoderma lucidum* JAPC1. **Korean Journal of Chemical Engineering**, v. 34, p. 1122–1128, 2017.

COELHO, J. S. et al. Comparative Removal of Bentazon by *Ganoderma lucidum* in Liquid and Solid State Cultures. **Current Microbiology**, v. 60, p. 350-355, 2010.

COELHO-MOREIRA, J. S. Evaluation of diuron tolerance and biotransformation by the white-rot fungus *Ganoderma lucidum*. **Fungal Biology**, v. 122, n. 6, p. 471-478, 2018.

EBELE, A. J.; ABDALLAH, M. A. E.; HARRAD, S. Pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in the freshwater aquatic environment. **Emerging Contaminants**, v. 3, n. 1, p. 1-16, 2017.

FARRADÁ, G. et al. Biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons by native *Ganoderma* sp. strains: identification of metabolites and proposed degradation pathways. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 103, p. 7203–7215, 2019.

GUPTA, S. K. et al. Bioelectrochemical technologies for removal of xenobiotics from wastewater. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 49, p. 1-24, 2022.

HANAFIAH, Z. M. et al. Ability of *Ganoderma lucidum* mycelial pellets to remove ammonia and organic matter from domestic wastewater. **International Journal of Environmental Science and Technology**, 2021. DOI: 10.1007/s13762-021-03633-3.

HANAFIAH, Z. M. et al. Performance of wild-Serbian *Ganoderma lucidum* mycelium in treating synthetic sewage loading using batch bioreactor. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, 2019.

HUSSAIN, I. et al. Chiral xenobiotics bioaccumulations and environmental health perspectives. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 187, n. 490, 2015.

KAUR, H.; KAPOOR, S.; KAUR, G. Application of ligninolytic potentials of a white-rot fungus *Ganoderma lucidum* for degradation of lindane. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 188, n. 588, 2016.

KENGERSKI, A. L. et al. Flotação por ar dissolvido no pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios utilizando cloreto férrico e tanino vegetal. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 7, n. 15, p. 257-267, 2020.

KOUR, D. et al. Beneficial microbiomes for bioremediation of diverse contaminated environments for environmental sustainability: present status and future challenges. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, p. 24917-24939, 2021.

KRISHNA, K.; PHILIP, L. Bioremediation of Cr(VI) in contaminated soils. **Journal of Hazardous Materials**, v. 121, n. 1-3, p. 109-117, 2005.

LLORCA, M. et al. Fungal biodegradation of the N-nitrosodimethylamine precursors venlafaxine and Odesmethylvenlafaxine in water. **Environmental Pollution**, v. 246, p. 346-356, 2019.

LUCAS, D. et al. The role of sorption processes in the removal of pharmaceuticals by fungal treatment of wastewater. **Science of the Total Environment**, v. 610-611, p. 1147-1153, 2018.

LU, J. et al. Molecular mechanisms of bioactive polysaccharides from *Ganoderma lucidum* (Lingzhi), a review. **Journal Pre-proof**, v. 150, p. 765-774, 2020.

MACIEL, G. M. et al. Biosorption of herbicide picloram from aqueous solutions by live and heat-treated biomasses of *Ganoderma lucidum* (Curtis) P. Karst and *Trametes* sp. **Chemical Engineering Journal**, v. 215-216, p. 331-338, 2013.

MAYORGA, R. et al. Degradation of sodium metamizole by enzymatic extracts from some white rot fungi. **Sydowia**, v. 69, p. 205–214, 2017.

MOHAMMADI-SICHANI, M. et al. Ability of *Agaricus bisporus*, *Pleurotus ostreatus* and *Ganoderma lucidum* compost in biodegradation of petroleum hydrocarbon-contaminated soil. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 16, p. 2313–2320, 2019.

MOHAPATRA, D.; RATH, S.; MOHAPATRA, P. Bioremediation of Insecticides by White-Rot Fungi and Its Environmental Relevance. **Mycoremediation and Environmental Sustainability**, p. 181-212, 2018.

NAZARI-SHARABIAN, M.; AHMAD, S.; KARAKOUZIAN, M. Climate Change and Eutrophication: A Short Review. **Engineering, Technology & Applied Science Research**, v. 8, n. 6, p. 3668-3672, 2018.

NUNES, C. S.; MALMLOF, K. Enzymatic decontamination of antimicrobials, phenols, heavy metals, pesticides, polycyclic aromatic hydrocarbons, dyes, and animal waste. **Enzymes in Human and Animal Nutrition**, 2018.

OLIVEIRA, M. et al. Pharmaceuticals residues and xenobiotics contaminants: Occurrence, analytical techniques and sustainable alternatives for wastewater treatment. **Science of the Total Environment**, 2019.

PEIXOTO, F.; MARINHO, G.; RODRIGUES, K. Corantes têxteis: uma revisão. **Holos**, v. 5, p. 1-9, 2013.

PELLETIER, F.; COLTMAN, D. W. Will human influences on evolutionary dynamics in the wild pervade the Anthropocene? **BMC Biology**, v. 16, n. 7, 2018.

PHALE, P. S.; SHARMA, A.; GAUTAM, K. Microbial degradation of xenobiotics like aromatic pollutants from the terrestrial environments. **Pharmaceuticals and Personal Care Products: Waste Management and Treatment Technology**, p. 259-278, 2019.

PUNNAPAYAK, H. et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) degradation by laccase from a tropical white rot fungus *Ganoderma lucidum*. **African Journal of Biotechnology**, v. 8, n. 21, p. 5897-5900, 2009.

RIBEIRO, H. Poluição, um veneno silencioso para a saúde humana. **Revista Ciência Elemental**, v. 7, n. 4, p. 1-5, 2019.

SHAHEEN, R. et al. Immobilized lignin peroxidase from *Ganoderma lucidum* IBL-05 with improved dye decolorization and cytotoxicity reduction properties. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 103, p. 57-64, 2017.

SHORE, R. F. et al. Detection and drivers of exposure and effects of pharmaceuticals in higher vertebrates. **Philosophical Transactions of Royal Society**, v. 369, n. 1656, p. 1-10, 2014.

SILAMBARASAN, S.; ABRAHAM, J. Efficacy of *Ganoderma* sp. JAS4 in bioremediation of chlorpyrifos and its hydrolyzing metabolite TCP from agricultural soil. **Journal of Basic Microbiology**, v. 54, n. 1, p. 44-55, 2014.

STEFANAC, T.; GRGS, D.; DRAGICEVIC, T. L. Xenobiotics—Division and Methods of Detection: A Review. **Journal of Xenobiotics**, v. 11, p. 130-141, 2021.

VASILIADOU, I. A. et al. Biological removal of pharmaceutical compounds using white-rot fungi with concomitant FAME production of the residual biomass. **Journal of Environmental Management**, v. 180, p. 228-237, 2016.

WANG, L. et al. Traditional uses, chemical components and pharmacological activities of the genus *Ganoderma* P. Karst.: a review. **Royal Society of Chemistry**, v. 10, p. 42084-42097, 2020.

YADAV, A. et al. Biodegradation of cyclophosphamide and etoposide by white rot fungi and their degradation kinetics. **Bioresource Technology**, v. 346, 2022.

XIANG, L. et al. Biodegradation of aromatic pollutants meets synthetic biology. **Synthetic and Systems Biotechnology**, v. 6, p. 153-162, 2021.

XU, H. et al. Expression and characteristics of manganese peroxidase from *Ganoderma lucidum* in *Pichia pastoris* and its application in the degradation of four dyes and phenol. **BMC Biotechnol**, v. 17, n. 19, 2017.