

FUNGOS BASIDIOMICETOS COMO AGENTES DE MICORREMEDIAÇÃO DE SOLOS
CONTAMINADOS

Basidiomycete fungi as mycoremediation agents of contaminated soils

Thaynã Gonçalves Timm¹; Maria Pilar Serbent^{2,3}; Judith Paola Urón Santiago⁴

Resumo: A presença de xenobióticos orgânicos e inorgânicos em solos afeta diversos ecossistemas acarretando danos ao meio ambiente e à saúde humana. Neste contexto, a micorremediação constitui uma alternativa para a descontaminação de ambientes. Dentro desta abordagem se destacam os fungos basidiomicetos, os quais possuem a capacidade de biotransformar diferentes contaminantes em solos poluídos. Esses processos são oxidativos, intra e extracelulares e não específicos, podendo ser compreendidos como processos multi-enzimáticos. A utilização de fungos tem um grande potencial que inclui ao composto residual remanescente ou substrato exaurido de cogumelo (SMS - *spent mushroom substrate* ou SMC - *spent mushroom compost*) da produção de cogumelos, o qual pode ser aproveitado em estratégias de micorremediação. O objetivo deste artigo é, portanto, realizar uma revisão bibliográfica referente à micorremediação de solos contaminados empregando fungos basidiomicetos. Além disso, são abordados os processos e as correspondentes enzimas envolvidas e, por fim, as perspectivas do emprego do SMS na biorremediação de solos contaminados.

Abstract: The presence of organic and inorganic xenobiotics in soils affects various ecosystems, causing damage to the environment and human health. Mycoremediation is an alternative for the decontamination of environments. Within this approach, basidiomycetes fungi stand out. They have the ability to biotransform different contaminants in polluted soils. These processes are oxidative, intra and extracellular, and non-specific, and can be understood as multi-enzyme processes. The use of fungi has a great potential that includes the residual or spent mushroom substrate (SMS or SMC) from mushroom production, which can be used in mycoremediation strategies. The objective of this paper is, therefore, to perform a literature review on the mycoremediation of contaminated soils using basidiomycete fungi. In addition, the processes and the corresponding enzymes involved are discussed and, finally, the perspectives of the use of SMS in the bioremediation of contaminated soils.

Palavras-chave:

xenobióticos;
biorremediação;
macrofungos; SMS.

Keywords: xenobiotics;
bioremediation; macrofungi;
SMS.

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Regional de Blumenau, Blumenau/SC. timm@furb.br

² Departamento de Engenharia Civil/Sanitária, Universidade Estadual de Santa Catarina, Ibirama/SC. mariapilar.serbent@udesc.br

³ Centro de Investigación y Tecnología Química, CITEQ-UTN-CONICET, Universidad Tecnológica Nacional, Fac. Regional Córdoba, Córdoba/Argentina.

⁴ FungiLab Extractos Naturales, Colômbia. paolauron@gmail.com

1 INTRODUÇÃO

A poluição de águas e solos por resíduos residenciais, industriais e do agronegócio, prejudica a disponibilidade de água afetando a segurança alimentar e, portanto, a saúde humana e a biodiversidade (AKHTAR; MANNAN, 2020). A poluição é, ainda, acentuada pelo constante crescimento da população, industrialização e urbanização, falta de planejamento e estratégias de gestão de resíduos (BARH et al., 2019; AKHTAR; MANNAN, 2020), além do crescente uso de defensivos agrícolas no manejo de pragas e doenças em culturas (ABREU et al., 2022). Dentre os poluentes mais comuns que se acumulam no solo se encontram os metais pesados, xenobióticos sintéticos e diversos poluentes orgânicos (BARH et al., 2019). Apesar de existirem métodos químicos e físicos para a remoção/degradação de diferentes substâncias poluentes no solo, o custo é elevado, são gerados subprodutos tóxicos e muitas vezes os métodos não são efetivos (AKHTAR; MANNAN, 2020). Portanto, é necessário desenvolver estratégias alternativas e de menor custo para a remediação de solos contaminados. Neste contexto, a biorremediação se apresenta como uma tecnologia limpa e segura (BARH et al., 2019).

Neste artigo será realizada uma revisão referente à micorremediação de solos contaminados empregando fungos basidiomicetos. Serão destacados os processos e enzimas envolvidas e, por fim, perspectivas de utilização do substrato exaurido do cultivo de cogumelos (*spent mushroom substrate* - SMS) na biorremediação do solo.

2 FUNGOS BASIDIOMICETOS E DECOMPOSIÇÃO DE MATÉRIA ORGÂNICA

Os fungos são fundamentais para o equilíbrio ambiental, pois, junto às bactérias heterotróficas, são os principais decompositores da biosfera (ABREU et al., 2015) utilizados na produção de alimentos e de suma importância agrícola e ecológica na manutenção do equilíbrio do ambiente. O presente trabalho, com base na literatura, menciona aplicações de fungos filamentosos, leveduras e cogumelos de uso medicinal e industrial. Entre os fungos filamentosos destacou-se o gênero *Aspergillus*, utilizado para a produção de proteínas recombinantes, já os fungos do gênero *Monascus* são promissoras fontes de corantes naturais e redutores do colesterol. Devido à importância econômica dos processos alimentícios, os trabalhos envolvendo a levedura *Saccharomyces cerevisiae* foram os de maior destaque. Pesquisas recentes indicam atributos medicinais de diversas espécies de cogumelos, como efeitos antivirais, antibacterianos, antiparasitários, antitumorais, anti-hipertensivos, antiateroscleróticos, hepatoprotetores, antidiabéticos, anti-inflamatórios e moduladores do sistema imune. Neste contexto, é necessário enfatizar a importância da Biotecnologia para a obtenção de diversas substâncias por meio da manipulação de fungos para a obtenção de novas tecnologias para o benefício da saúde humana e equilíbrio ambiental. PALAVRAS-CHAVE: Fungos, biotecnologia, saúde.”, "author": [{"dropping-particle": "", "family": "Abreu", "given": "J. A. S.", "non-dropping-particle": "", "parse-names": false, "suffix": ""}, {"dropping-particle": "", "family": "Rovida", "given": "A. F. S.", "non-dropping-particle": "", "parse-names": false, "suffix": ""}, {"dropping-particle": "", "family": "Pamphile", "given": "J. A.", "non-dropping-particle": "", "parse-names": false, "suffix": ""}], "container-title": "Revista UNINGÁ Review", "id": "ITEM-1", "issue": "1", "issued": {"date-parts": [{"2015}], "page": "55-59", "title": "Fungi of Interest: Biotechnological Applications", "type": "article-journal", "volume": "21"}, "uris": [{"http://www.mendeley.com/documents/?uuid=45655081-2f2d-47ea-8419-90c34e4bb481"}], "mendeley": {"formattedCitation": "(ABREU; ROVIDA; PAMPHILE, 2015. A maioria dos fungos são saprofitos e exercem um papel importante na ciclagem de nutrientes (GIMENES, 2010). Nesta ciclagem, é liberado dióxido de carbono e os compostos nitrogenados e outras substâncias retornam ao solo, podendo ser reutilizados pelas plantas e animais (JUDD, 2009).

A capacidade de decomposição por parte dos fungos se deve à ação de suas enzimas que quebram

moléculas orgânicas em um processo essencial para o crescimento destes organismos (JUDD, 2009). Os fungos com melhor desempenho na biotransformação pertencem ao filo Basidiomycota (BENTO; CASARIL, 2012), que compreende mais de 40.000 espécies descritas (HE et al., 2022). Os basidiomicetos degradadores da madeira têm sido classificados como fungos podridão branca (FPB) ou de podridão castanha, com base na capacidade (apenas nos FPB) de degradar a lignina juntamente com a celulose e a hemicelulose (RILEY et al., 2014).

A forma vegetativa dos fungos basidiomicetos está constituída por micélio filamentosos e, em algumas espécies, sua fase reprodutiva está representada por estruturas macroscópicas chamadas de cogumelos (GIMENES, 2010; FORZZA et al., 2010; PEDRI, 2014). São encontrados em diversos ambientes, substratos e biomas (GIMENES, 2010) e apresentam seus basidiomas acima do solo (RIBEIRO et al., 2008) *Suillus luteus*, *Suillus granulatus*, *Tricholomopsis rutilans*, *Hygrophorus agathosmus*, *Amanita rubescens*, *Russula cyanoxantha*, *Boletus edulis*, *Tricholoma equestre*, *Fistulina hepatica*, and *Cantharellus cibarius*. Ao utilizar resíduos como fonte de energia, esses fungos exercem papel importante na diminuição de danos ambientais (BENTO; CASARIL, 2012), podendo ser empregados eficientemente na micorremediação de solos contaminados por diferentes poluentes (AKHTAR; MANNAN, 2020).

3 MICORREMEDIAÇÃO

O processo de micorremediação se refere ao uso de fungos para a biotransformação de poluentes e desintoxicação de solos e águas residuais (BARH et al., 2019; BOSCO; MOLLEA, 2019). É um método simples, efetivo e econômico de reduzir o nível de contaminação por meio de processos de degradação, acumulação ou imobilização de substâncias orgânicas e inorgânicas perigosas com baixo uso de químicos, energia e tempo (DUTTA; HYDER, 2017; BOSCO; MOLLEA, 2019). A capacidade dos fungos em transformar compostos xenobióticos faz com que estes organismos sejam cada vez mais abordados em processos de biorremediação (BARH et al., 2019; BOSCO; MOLLEA, 2019).

A micorremediação em solos contaminados com diversos tipos de poluentes, como corantes/tintas, herbicidas e fármacos, pode ser realizado *in-situ* ou *ex-situ* (utilizando biorreatores). Na técnica *in-situ*, o micélio fúngico pode ser misturado com o solo contaminado ou ser distribuído na superfície dos locais contaminados. Já na técnica *ex-situ*, é possível controlar as condições físico-químicas do processo, o que promove o crescimento da biomassa fúngica e regula o uso dos metabólitos, acelerando a degradação dos poluentes. Esses biorreatores podem ser utilizados para remediar solos contaminados com hidrocarbonetos aromáticos policíclicos, herbicidas, pesticidas, alcatrões, solventes clorados e explosivos (DUTTA; HYDER, 2017; AKHTAR; MANNAN, 2020).

A micorremediação depende das características físico-químicas do solo (pH, temperatura, umidade, potencial redox). Além disso, a atividade dos fungos depende da disponibilidade de macro e micronutrientes no solo e do tipo, concentração, toxicidade, mobilidade e biodisponibilidade do contaminante. A micorremediação pode ser uma técnica efetiva para a biorremediação do solo (BARH et al., 2019; AKHTAR; MANNAN, 2020) e pode ser realizada na presença de diferentes espécies de fungos. A biodegradação de xenobióticos depende, ainda, da espécie fúngica, das suas características genéticas e do seu sistema enzimático (BOSCO; MOLLEA, 2019).

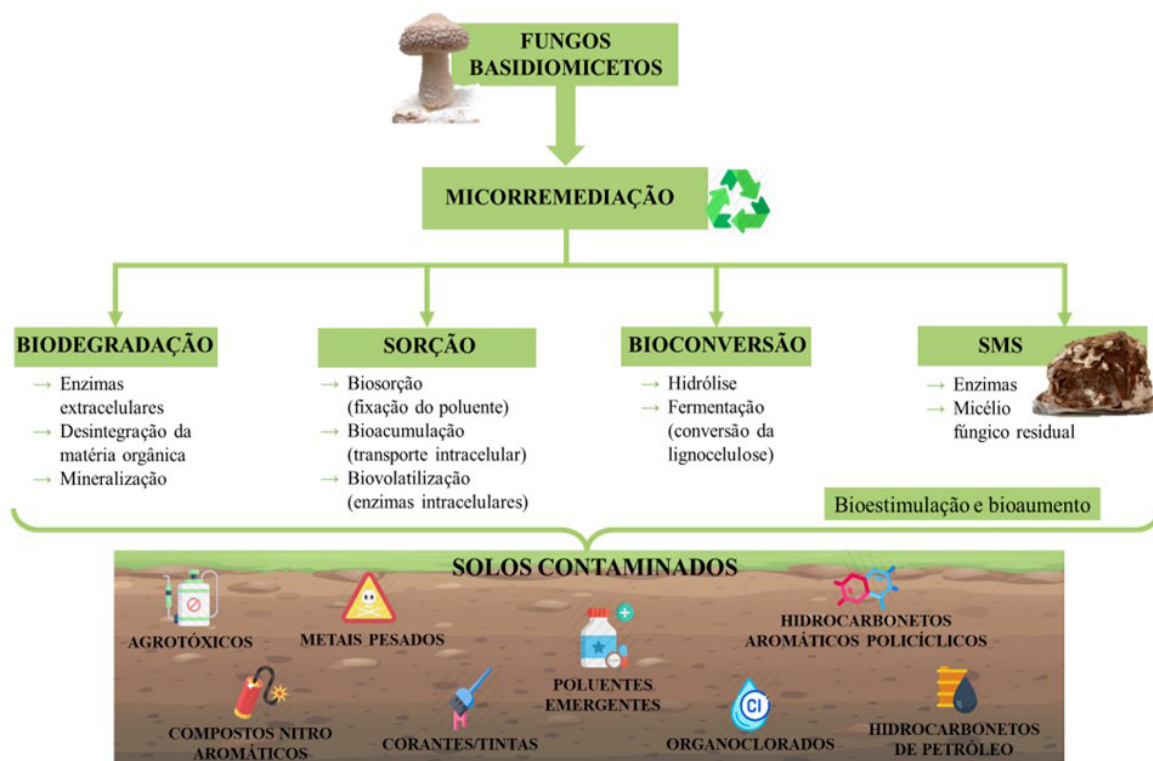
Dentre os fungos promissores para este processo, estão os basidiomicetos saprotróficos e biotróficos, cogumelos comestíveis e outros FPB (BARH et al., 2019; BOSCO; MOLLEA, 2019). O uso de fungos basidiomicetos é mais vantajoso do que outros organismos, como leveduras e bactérias, por exemplo, pela sua capacidade de colonizar diferentes ambientes/superfícies e adaptar-se a matrizes complexas de solo e condições ambientais extremas. O processo é, ainda, favorecido pela sua capa-

cidade de decomposição da matéria orgânica devido à produção de enzimas extracelulares, por sua vasta rede de hifas, seu crescimento vigoroso e rede micelial multicelular, bem como pela produção de compostos bioativos. Além disso, os fungos basidiomicetos colonizam grandes áreas superficiais, se adaptam facilmente a mudanças de pH e de temperatura e possuem elevada tolerância a metais pesados, além de grande capacidade de co-metabolizar diversos químicos ambientais (BOSCO; MOLLEA, 2019; AKHTAR; MANNAN, 2020).

4 MICORREMEDIAÇÃO DE SOLOS COM FUNGOS BASIDIOMICETOS

Os solos podem estar contaminados com diversos poluentes, como agrotóxicos e substâncias provenientes deles, corantes/tintas, compostos nitro aromáticos, hidrocarbonetos de petróleo, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos, metais pesados e organoclorados (DUTTA; HYDER, 2017; BRAUN et al., 2019; AKHTAR; MANNAN, 2020). Os fungos basidiomicetos vêm sendo reportados como potenciais biorremediadores de solos contaminados com diferentes poluentes (CHATTERJEE et al., 2017) (Figura 1). Sua capacidade de biodegradação se deve à produção de enzimas extracelulares; ligninolíticas como lignina peroxidase (LiP), manganês peroxidase (MnP) e lacase (Lac), celulases, pectinases, xilanases, oxidases, além de várias enzimas produtoras de H_2O_2 que agem sobre os componentes da lignina e são capazes de oxidar poluentes recalcitrantes (RHODES, 2014; DUTTA; HYDER, 2017). A Figura 1 sumariza os principais processos da micorremediação de solos contaminados utilizando fungos basidiomicetos.

Figura 1. Papel dos fungos basidiomicetos na micorremediação de solos contaminados.



A micorremediação desses diversos poluentes incluem três principais processos: biodegradação, sorção e bioconversão (DUTTA; HYDER, 2017). Na biodegradação ocorre um processo de reciclagem, no qual os fungos desintegram o material orgânico em nutrientes por meio da ação de enzimas extra-

celulares. Há uma mineralização completa de compostos moleculares complexos em formas mais simples e é um processo eficiente para a degradação de poluentes não poliméricos como tintas/corantes, nitrotoluenos, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos e pentaclorofenol (BARH *et al.*, 2019). O mecanismo de biodegradação é muito complexo e há influência de outros sistemas bioquímicos e interações de enzimas produzidas pelos fungos (DUTTA; HYDER, 2017).

A sorção de poluentes do ambiente pelos fungos ocorre por meio de processos de bioacumulação, bioadsorção e biovolatilização. Na bioacumulação, os processos dependem do metabolismo ativo dos fungos e há transporte do poluente para dentro da célula fúngica e parcialmente para os componentes intracelulares no organismo vivo. Na bioadsorção, há uma fixação (adsorção) do poluente na biomassa viva ou morta do fungo, sendo um processo passivo sem dependência do metabolismo fúngico. Já a biovolatilização envolve a conversão de compostos nos seus derivados voláteis por reações enzimáticas intracelulares. Esses processos são muito eficazes para a remoção de metais e metalóides (BARH *et al.*, 2019; AKHTAR; MANNAN, 2020).

Por fim, o processo de bioconversão ocorre pela conversão da lignocelulose em bioprodutos, envolvendo procedimentos de pré-tratamento, hidrólise e fermentação. Este processo é muito utilizado para conversão de resíduos agroindustriais e florestais, materiais lenhosos, grama, resíduos sólidos municipais e outros resíduos lignocelulósicos (BARH *et al.*, 2019). A bioconversão de materiais lignocelulósicos por fungos ocorre pela ação de enzimas e de compostos extracelulares de baixa massa molar. Primeiro, os componentes lignocelulósicos são despolimerizados extracelularmente, até compostos menores susceptíveis ao transporte pela parede celular e ação do metabolismo intracelular fúngico. O lúmen das células vegetais é penetrado pelas hifas fúngicas produzindo diminuindo a sua espessura ou removendo a lignina sem erosão da parede celular (ESPOSITO; AZEVEDO, 2004).

Para estimular a micorremediação, reduzindo o tempo e melhorando a remoção do contaminante, podem ser realizadas duas técnicas: bioestimulação e bioaugmentação. Na bioestimulação, são adicionados no local contaminado nutrientes para estimular a ação microbiana. Já na bioaugmentação, microrganismos alóctones ou autóctones enriquecidos, capazes de metabolizar contaminantes específicos, são introduzidos no ambiente (DUTTA; HYDER, 2017).

O Quadro 1 sumariza estudos da última década com ênfase em micorremediação utilizando fungos basidiomicetos para a remoção/degradação de compostos xenobióticos no solo, mostrando as eficiências alcançadas e as atividades enzimáticas envolvidas nos respectivos processos.

Conforme estudos sumarizados no Quadro 1, diversas pesquisas têm demonstrado a capacidade de fungos basidiomicetos de biodegradação de diferentes poluentes em solos. A seguir, serão mencionados alguns resultados obtidos nos estudos apresentados, dentro de cada categoria de contaminante do solo, além da síntese dos processos atuantes na biodegradação de diferentes compostos tóxicos por fungos.

4.1 Agrotóxicos/Pesticidas

Dentre os poluentes no ambiente e no solo, os pesticidas são um dos grupos mais representativos e estudados, por seu uso intensivo e capacidade de acumulação no solo dos seus produtos de degradação (DELLAMATRICE *et al.*, 2012) clorotalonil e deltametrina. Exemplos desses poluentes são paraquat, clorotalonil, deltametrina, DDT, 2,4-D, aldrin e dieldrin (PURNOMO *et al.*, 2011; DELLAMATRICE *et al.*, 2012; CAMACHO-MORALES *et al.*, 2017; PURNOMO *et al.*, 2017; SERBENT *et al.*, 2020) clorotalonil e deltametrina. Os principais mecanismos de biodegradação desses poluentes por fungos basidiomicetos podem ser epoxidação e hidroxilação pela ação de enzimas como Lac, MnP e aril-álcool oxidase (CAMACHO-MORALES *et al.*, 2017; PURNOMO *et al.*, 2017) an efficient degradation method is required. In this study, we investigated the ability of *Pleurotus ostreatus* to transform aldrin as well as

dieldrin in pure liquid cultures. This fungus completely eliminated aldrin in potato dextrose broth (PDB).

Dellamatrice et al. (2012) relataram a capacidade dos fungos basidiomicetos *Pleurotus ostreatus* e *Phanerochaete cryosporium* de remover paraquate, clorotalonil e deltametrina do solo, com e sem uso de surfactantes. Observou-se que a maior quantidade de enzimas foi produzida no período de degradação do herbicida paraquate, sendo completa na presença de surfactantes. Já a degradação do clorotalonil foi acelerada pela presença do surfactante e só ocorreu após a degradação do paraquate e, por fim, o inseticida deltametrina foi o menos degradado. Outro estudo envolvendo a investigação da tolerância e a biotransformação do herbicida paraquat foi realizado utilizando 54 fungos macromicetos e revelando que dez espécies foram capazes de se desenvolver em meios contendo esse herbicida (200 ppm), sendo *Trametes pavonia* (54,2%), *T. versicolor* (54,1%) e *Hypholoma dispersum* (70,7%) com as maiores taxas de degradação (CAMACHO-MORALES et al., 2017)

Por fim, Purnomo et al. (2011) descreveram a habilidade dos FPB *Gloeophyllum trabeum*, *Fomitopsis pinicola* e *Daedalea dickinsii* de remover DDT. Além disso, a adição de Fe²⁺ nos solos testados aumentou a capacidade de eliminação do DDT pelos fungos.

Quadro 1. Fungos basidiomicetos utilizados como micorremediadores de solos contaminados com diferentes tipos de xenobióticos.

Composto xenobiótico no solo		Fungo basidiomiceto estudado	Remoção/ transformação do poluente	Atividade enzimática	Referência
Agrotóxicos	Agrotóxicos (paraquat, clorotalonil e deltametrina)	<i>Pleurotus ostreatus</i> e <i>Phanerochaete cryosporium</i>	<i>P. ostreatus</i> : 65,57% em 10 dias (paraquate), 81,87% em 14 dias (clorotalonil); <i>P. cryosporium</i> : 100% em 10 dias (todos)	-	DELLAMATRICE et al., 2012
	DDT (1,1,1-tricloro-2,2-bis(4-clorofenil)etano)	<i>G. trabeum</i> , <i>D. dickinsii</i> e <i>F. pinicola</i>	<i>G. trabeum</i> : 36% a 42,8% (14 dias)	-	PURNOMO et al., 2011
	Paraquat (1,1'-dimetil-4,4'-bipiridina-dicloreto)	<i>Fomitopsis meliae</i> , <i>Trametes maxima</i> , <i>Polyporus tricholoma</i> , <i>T. villosa</i> , <i>T. pavonia</i> , <i>T. ellipsospora</i> , <i>T. versicolor</i> e <i>Hypholoma dispersum</i> .	<i>H. dispersum</i> : 70,7% em 12 dias	Lac, MnP, aril-álcool oxidase	CAMACHO-MORALES et al., 2017
Corantes/tintas	Corante vermelho congo	<i>Pleurotus ostreatus</i>	70%	-	BHATTACHARYA et al., 2011
Compostos nitro aromáticos	2, 4, 6-Trinitrotolueno (TNT)	<i>Gymnopilus luteofolius</i> , <i>Kuehneromyces mutabilis</i> , <i>Mycena galericulata</i> , <i>Phanerochaete velutina</i> , <i>Physisporinus rivolosus</i> e <i>Stropharia rugosoannulata</i>	<i>P. velutina</i> : 80% em 2,5 meses (escala laboratorial) e 70% em 49 dias (escala piloto)	MnP	ANASONYE et al., 2015
Hidrocarbonetos de petróleo	Óleo combustível	<i>Irpex lacteus</i> , <i>Trichaptum bifforme</i> , <i>Phlebia radiata</i> , <i>Trametes versicolor</i> e <i>Pleurotus ostreatus</i>	Alcano C10 (pelo menos 96%), Alcano C14 (48.6%) e fenatreno (76.4%)	-	YOUNG et al., 2015
	Óleo Cru	<i>Polyporus sp. S133</i>	93%	-	KRISTANTI et al., 2011

Composto xenobiótico no solo		Fungo basidiomiceto estudado	Remoção/ transformação do poluente	Atividade enzimática	Referência
Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos	Fenantreno, pireno, benzo(a)pireno	<i>Crucibulum laeve</i>	64% (Fenatreno), 41,7% (Pireno) e 39,1% (benzo(a)pireno), em 60 dias	Lac e polifenol oxidase	MA et al., 2021
	Benzo(a)pireno	<i>Pleurotus ostreatus</i>	>70%	-	BHATTACHARYA et al., 2014
Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos e metais pesados	Cimento e bateria	<i>Pleurotus pulmonarius</i>	Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos: 8,16%; Metais pesados: 79,69% (Pb), 45,72% (Mn), 10% (Ni), 0% (Cu); (10 semanas)	-	ADENIPEKUN et al., 2011
Metais pesados	Cádmio (Cd), Cobre (Cu) e Chumbo (Pb)	<i>A. arvensis</i> , <i>A. bisporus</i> , <i>M. platyphylla</i> , <i>P. ostreatus</i> , <i>P. pulmonarius</i> , <i>F. fomentarius</i> , <i>L. sulphureus</i> , <i>C. xanthothrix</i> , <i>C. micaceus</i> , <i>G. resinaceum</i> , <i>P. fraxinea</i> , <i>P. candolleana</i> , <i>S. commune</i> , <i>I. lacteus</i> e <i>P. peniophoroides</i>	Tolerância Cd > 100 mg/L (6 espécies - 21,5%); Tolerância Cu > 100 mg/L (5 espécies - 20,9%); Tolerância Pb > 100 mg/L (8 espécies) e > 1000 mg/L (5 espécies - 56,7%)	-	ALBERT et al., 2020
	Cádmio (Cd)	<i>A. subrufescens</i>	>80%	-	STOKNES et al., 2019
	Cádmio (Cd), Cobre (Cu) e Chumbo (Pb)	<i>Coprinus comatus</i>	19,08 mg (Pb), 17,57 mg (Cu) e 0,55 mg (Cd), por kg de solo	-	CEN et al., 2012
Organoclorados	Bifenilpoliclorados (PCBs)	<i>Trametes sanguinea</i> e <i>Pleurotus sajor-caju</i> (cocultura e monocultura)	Micoargumentação: 91% (cultura mista), 90% (<i>P. sajor-caju</i>) e 88% (<i>T. sanguinea</i>) em 90 dias; Bioestimulação: 88% em 90 dias; Atenuação natural: < 20%	Lac, MnP, endoxylanase e endoglucanase	SADANOSKI et al., 2020
	Pentaclorofenol	<i>Lentinus crinitus</i>	>80% (10 dias)	Lac e MnP	BALLAMINUT et al., 2014

4.2 Corantes e tintas

Existem poucos estudos para a micorremediação de solos contaminados por corantes e tintas. Bhattacharya et al. (2011) estudaram a micorremediação utilizando várias espécies de fungos basidiomicetos e deuteromicetos para a descoloração do corante vermelho do Congo (0,05 g/l). A descoloração obtida em condições otimizadas variou entre 29,25 e 97,28% em condição estática e 82,1 - 100% em condição de agitação e houve significativa presença de Lacs fúngicas.

4.3 Compostos nitro aromáticos

Dentre os compostos nitro aromáticos susceptíveis à degradação fúngica está o TNT, um dos explosivos mais comuns. O mecanismo ocorre por ação da enzima MnP em uma série de processos que

incluem a redução dos grupos nitro, a quebra de estruturas aromáticas, a redução a metabólitos, a formação de radicais e a quebra das estruturas aromáticas dos metabólitos, resultando na mineralização do TNT (ANASONYE *et al.*, 2015). Esses autores reportaram o crescimento dos FPB *Gymnopilus luteofolius*, *Kuehneromyces mutabilis* e *Phanerochaete velutina* em solos contaminados com TNT (1000 mg.kg⁻¹) não esterilizados e a produção de enzimas para a degradação deste composto. Os fungos apresentaram elevada produção de MnP sendo *P. velutina* o fungo com maior eficiência de degradação (80% em 2,5 meses).

4.4 Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos e óleos minerais

Os hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAHs) podem ser transformados por fungos por meio do sistema de enzimas extracelulares degradadoras de lignina (BOSCO; MOLLEA, 2019). Além disso, os fungos são capazes de difundir na matriz do solo, absorver e degradar os PAHs via complexo intracelular de citocromo P450/epóxido hidrolase (BOSCO; MOLLEA, 2019). Dentre os PAHs, o Fenantreno, o pireno e o benzo(a)pireno são conhecidos como poluentes orgânicos perigosos por seu potencial carcinogênico, mutagênico e tóxico para humanos e animais, além de serem bioacumulados em cadeias alimentares e nos organismos vivos (BHATTACHARYA *et al.*, 2014; MA *et al.*, 2021) teratogenic and mutagenic effects. The highly recalcitrant nature of Benzo[a]pyrene poses a major problem for its degradation. White-rot fungi such as *Pleurotus ostreatus* can degrade Benzo[a]pyrene by enzymes like laccase and manganese peroxidase. The present investigation was carried out to determine the extent of Benzo[a]pyrene degradation by the PO-3, a native isolate of *P. ostreatus*, in the presence of heavy metals and ligninolytic enzyme mediators. Modified mineral salt medium was supplemented with 5 mM concentration of different heavy metal salts and ethylene-diaminetetraacetic acid. Vanillin and 2,2,0 -azinobis-(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonate). Além da ação de enzimas extracelulares ligninolíticas, esses compostos podem ser transformados pela enzima polifenol oxidase de fungos basidiomicetos ou pela produção de ácidos orgânicos.

Na biodegradação de óleos minerais, os fungos são capazes de utilizar o óleo cru como única fonte de carbono e energia. As enzimas fúngicas envolvidas no sistema de degradação desses hidrocarbonetos são as hidrolases, desidrogenases e citocromo ligada à membrana. Já para a degradação de hidrocarbonetos derivados de petróleo, os fungos utilizam o sistema de enzimas ligninolíticas (BOSCO; MOLLEA, 2019).

Estudos realizados para investigação de degradação de compostos por FPB revelam que *Irpex lacteus*, *Trichaptum bifforme*, *Phlebia radiata*, *Trametes versicolor* e *Pleurotus ostreatus* são capazes de degradar compostos de óleo combustível (48,6% a 98,1%, em média) após 180 dias (YOUNG *et al.*, 2015); *P. ostreatus* possui capacidade de degradar benzo[a]pireno, na presença de metais pesados e enzimas ligninolíticas como mediadores (74,2 % na presença de cobre 15 mM; 78,7 % na presença de Lac sintética 1 mM; e 83,6 % na presença de vanilina 5 mM) (BHATTACHARYA *et al.*, 2014); e *Polyporus sp.* pré-cultivado em farinha de madeira possui potencial de biorremediação do petróleo bruto no solo (93% de taxa de degradação, com adição de 10% de sumaúma) (KRISTANTI *et al.*, 2011).

A capacidade de micorremediação de *Pleurotus pulmonaris* para PAHs e teor de metais pesados em solos poluídos de cimento e resíduos de bateria foi estudada por Adenipekun *et al.* (2011). Para o teor de chumbo (8 ppm) e hidrocarbonetos poliaromáticos (PAH) houve diminuição gradual após 10 semanas, enquanto para cobre, manganês e níquel foi observada diminuição significativa antes deste período em solo contaminado com cimento.

Em estudo mais recente de remediação de PAHs no solo, Ma *et al.* (2021) caracterizaram a dinâmica ecológica de atenuação natural, micorremediação (MR, usando *Crucibulum laeve*), fitorremediação (PR, usando *Salix viminalis*) e remediação planta-microbiana (PMR, usando ambas as espécies) por

60 dias. A MR forneceu nutrientes adicionais e manteve a diversidade da comunidade microbiana. A inoculação combinada de *S. viminalis* e *C. laeve* estimulou sinergicamente o crescimento de microrganismos degradadores de PAH e manteve a biomassa bacteriana, acelerando assim a dissipação de PAHs do solo.

4.5 Metais pesados

Os metais pesados que contaminam o solo, como cádmio (Cd), cobre (Cu) e chumbo (Pb), são uma preocupação por serem tóxicos e se bioacumularem em cadeias alimentares (CEN et al., 2012; STOKNES et al., 2019; ALBERT et al., 2020) partly caused by mineral fertiliser use. In many areas in the EU, intake of Cd is not far from the maximum tolerable level. Now, urban and more circular approaches to food production are being promoted, in which waste materials substitute growing media and fertilizers. Can this make the situation worse, or is it, on the contrary, possible to extract Cd from the cycle using practical microbial methods? Cd concentration, availability and accumulation in materials and crops in a closed greenhouse system was investigated first. Secondly, we tested if fungal remediation was able to remove a significant amount of Cd. A sequential extraction analysis showed how anaerobic digestion and composting changed chemical Cd availability. Cd levels in the system were comparable to agricultural soils. The vegetable crops did not accumulate Cd. However, the culture of the edible mushroom *Agaricus subrufescens* in the greenhouse had a strong effect on Cd mobility: It extracted 80% of the Cd from the growing medium into the mushrooms, mostly at the start of fruiting. These early Cd enriched mushrooms can be treated as special waste, while the later harvest complied with EU Cd limits for foodstuffs and can potentially be consumed. Thus, growing this mushroom species in an integrated waste-to-crop system can be a cost-efficient way to remediate Cd from the food chain.”, "author": [{"dropping-particle": "", "family": "Stoknes", "given": "K.", "non-dropping-particle": "", "parse-names": false, "suffix": ""}, {"dropping-particle": "", "family": "Scholwin", "given": "F.", "non-dropping-particle": "", "parse-names": false, "suffix": ""}, {"dropping-particle": "", "family": "Jasinska", "given": "A.", "non-dropping-particle": "", "parse-names": false, "suffix": ""}, {"dropping-particle": "", "family": "Wojciechowska", "given": "E.", "non-dropping-particle": "", "parse-names": false, "suffix": ""}, {"dropping-particle": "", "family": "Mleczek", "given": "M.", "non-dropping-particle": "", "parse-names": false, "suffix": ""}, {"dropping-particle": "", "family": "Hanc", "given": "A.", "non-dropping-particle": "", "parse-names": false, "suffix": ""}, {"dropping-particle": "", "family": "Niedzielski", "given": "P.", "non-dropping-particle": "", "parse-names": false, "suffix": ""}], "container-title": "Journal of Environmental Management", "id": "ITEM-1", "issue": "June 2018", "issued": {"date-parts": [[2019]]}, "page": "48-54", "publisher": "Elsevier", "title": "Cadmium mobility in a circular food-to-waste-to-food system and the use of a cultivated mushroom (*Agaricus subrufescens*). Os fungos basidiomicetos possuem elevada tolerância a estes metais, empregam o micélio para retirar os metais do solo e o acumulam no basidioma (BOSCO; MOLLEA, 2019). A presença de metais induz a produção de metabólitos secundários desintoxicantes, como ácido oxálico, metalotioneína e tióis, que podem moldar a mobilização de metais residuais e melhorar as interações com a parede celular e o processo de biossorção (ALBERT et al., 2020).

Estudos relatam a capacidade de tolerância a metais por diferentes espécies de FPB. Albert et al. (2019) verificaram, entre 28 fungos, a capacidade de tolerância e biossorção de metais traço (Cd, Cu e Pb) por *Absidia cylindrospora* (acima de 45% para Cd e Pb), *Chaetomium atrobrunneum* (acima de 45% para Cd, Cu e Pb) e *Coprinellus micaceus* (biosorveu 100% de Pb). Além dessas espécies, estudos destacam *Agaricus subrufescens* na remoção de Cd (80%, com mobilidade do Cd acentuada no início da frutificação) (Stoknes et al., 2019) e *Coprinus comatus* na bioextração de metais pesados (Pb, Cu e Cd) do solo induzida por quelantes, com aplicação de ácido etilenodiaminotetracético (EDTA) ou nitrilotriacetato (NTA), que ocasionaram aumento significativo no acúmulo de metais pesados nos

corpos de frutificação em comparação com tratamento controle (CEN et al., 2011).

4.6 Compostos orgânicos halogenados e fenóis

Outros compostos geralmente detectados em solos, são os orgânicos halogenados, como PCBs, que são persistentes no ambiente e podem acumular na cadeia alimentar e em tecidos animais. Estes compostos podem ser micorremediados e o processo é baseado no crescimento fúngico pela extensão de hifas, que permitem penetrar nas matrizes ambientais. Há, então, a secreção de enzimas oxidativas modificadoras de lignina, como Lac, MnP, endoxylanase e endoglucanase, que não possuem especificidade de substrato e podem, portanto, degradar diversos poluentes orgânicos (SADAÑOSKI *et al.*, 2020).

Diversos autores têm estudado o potencial biorremediador de cepas fúngicas. Ballaminut et al. (2014) estudaram o desempenho de *Lentinus crinitus*, inoculado em palha de cana-de-açúcar moída e aplicado em solo contaminado com pentaclorofenol (PCF). Os resultados indicaram o papel da Lac e a MnP na biotransformação do PCF e confirmou o potencial de biorremediação de *L. crinitus*.

Sadanoski et al. (2020) investigaram a eficiência de co-cultivos de *Trametes sanguinea* e *Pleurotus sajor-caju* imobilizados em bagaço de cana-de-açúcar na transformação de bifenis policlorados (PCBs) em solos. O experimento demonstrou elevada remoção (~90%) de PCBs em 90 dias. As cepas estudadas sobreviveram no solo e as atividades de Lac, MnP, endoxilanase e desidrogenase aumentaram significativamente em co-culturas. Além disso, houve melhora dos teores de matéria orgânica oxidável e fósforo no solo.

4.7 Contaminantes emergentes

Dentro do grupo de contaminantes emergentes, incluem-se diversos produtos químicos antropogênicos, de desregulação endócrina (EDCs) e farmacêuticos para cuidados pessoais (PPCPs). Estes compostos têm despertado grande interesse de pesquisadores por seus efeitos biológicos em organismos não-alvo. Os fungos basidiomicetes são capazes de diminuir sua atividade e ecotoxicidade e transformar esses contaminantes por meio do seu sistema enzimático (BOSCO; MOLLEA, 2019). Estes poluentes emergentes são encontrados tanto nos solos quanto em efluentes, porém há escassez de estudos quanto à micorremediação em solos, havendo mais aprofundamento de pesquisas em relação a micorremediação de fármacos e disruptores endócrinos utilizando fungos basidiomicetes em águas residuais, por exemplo (TAHERAN et al., 2016; MUSZYŃSKA et al., 2018).

5 SUBSTRATO EXAURIDO DO CULTIVO DE COGUMELOS (SMS) NA MICORREMEDIAÇÃO

Na produção de cogumelos, em sistema axênico, utilizando resíduos agroindustriais como substrato, há geração de um composto residual remanescente (UMOR et al., 2021), denominado substrato ou composto exaurido de cogumelo (SMS - *spent mushroom substrate* ou SMC - *spent mushroom compost*) (PÉREZ-CHÁVEZ et al., 2019). O SMS é um subproduto não completamente degradado, pois a eficiência de degradação dos materiais lignocelulósicos pelos cogumelos alcança cerca de 40 a 80%. A composição do SMS irá depender do substrato utilizado no cultivo do cogumelo, bem como sua espécie e as condições e métodos de cultivo (UMOR et al., 2021), por exemplo. Em geral, consiste em micélio fúngico residual, biomassa lignocelulósica desintegrada, matéria orgânica e enzimas extracelulares lignocelulósicas, como Lac, MnP, proteínas, carboidratos, lipídios e nutrientes residuais, como nitrogênio, potássio, fósforo, cálcio e ferro (BELLETTINI, 2014; BARH et al., 2019;

PÉREZ-CHÁVEZ et al., 2019; UMOR et al., 2021; LEONG et al., 2022).

O SMS é tratado como resíduo da agricultura (BARH et al., 2019, LEONG et al., 2022) sendo disposto inadequadamente no ambiente, tornando-se assim um passivo ambiental (VIOTTO, 2016). Quando aproveitado, o foco da maioria dos estudos referentes às possibilidades de utilização deste substrato aponta ao melhoramento dos solos destinados à produção agrícola de alimentos (NAKATSUKA et al., 2016; MORAES et al., 2022; OTHMAN et al., 2020; ZIED et al., 2021).

A produção de cogumelos em diversos substratos lignocelulósicos vem ganhando interesse nos últimos anos. A obtenção de enzimas ligninolíticas a partir de SMS residuais é uma excelente alternativa no contexto de economia circular (PÉREZ-CHÁVEZ et al., 2022). Para cada 1 kg de cogumelos cultivados são gerados 4 - 5 kg de SMS (UMOR et al., 2021) e estima-se que a produção anual de SMS supera as 60 milhões de toneladas, tendendo a aumentar significativamente, considerando o rápido crescimento mundial da produção de cogumelos (LEONG et al., 2022). Tanto pela quantidade gerada, quanto por suas características, a possibilidade de obter enzimas ligninolíticas como subproduto do SMS é um aspecto que deveria ser mais explorado, principalmente para fins de bioremediação ou outras utilizações industriais (PÉREZ-CHÁVEZ et al., 2022).

Por ser uma fonte de enzimas extracelulares lignocelulolíticas e pela presença de cogumelo remanescente, o SMS pode auxiliar na biorremediação *in situ* de solos contaminados com poluentes orgânicos e inorgânicos (WANG et al., 2016; BARH et al., 2019; CORRAL-BOBADILLA, 2019) permitiria o controle do comportamento de pesticidas nesse compartimento ambiental (MARÍN-BENITO et al., 2016). Wang et al., (2016) descreveram a efetividade da mistura de SMS de *Lentinula edodes* com lodo de esgoto aclimatado (LEA) na biorremediação de solos contaminados com PAHs. Os autores reportaram que a adição da mistura estimulou significativamente o desenvolvimento de microrganismos do solo, atingindo uma remoção de até 94% em todos os PAHs. O SMS melhorou a população de fungos do solo e teve melhor efeito na degradação de PAHs de maior peso molecular. Rossiana et al., (2017) compararam a eficiência da mistura de vermicomposto, SMS, composto doméstico e lixiviado, como inóculo de microrganismos na biorremediação de lodo de óleo. Os autores montaram experimentos com lodo de óleo (30%), solo (30%), areia (15%) e 25% de cada inoculo e observaram maior diminuição (27,7%) no conteúdo de hidrocarbonetos totais de petróleo em presença de SMS. Os efeitos positivos da utilização de SMS na remediação de solos contaminados com o herbicida clorimuron-ethyl foram descritos por Zang et al. (2020). Por meio da ação das bactérias *Rhodococcus* sp. D310-1 e *Enterobacter* sp. D310-5 co-cultivadas com SMS de *Pleurotus eryngii*, os autores reportaram eficiências de remoção do herbicida acima de 90% após 80 dias de tratamento.

Gbarakoro e Chukumati (2019) demonstraram a capacidade de SMS de *Pleurotus ostreatus* na redução, a curto prazo, da carga orgânica de lubrificante para automóveis presente em solos, melhorando a mobilização de nutrientes e o equilíbrio ecológico do ecossistema. Além disso, para solos contaminados com óleo cru, Ogbonna et al. (2020) reportaram que em presença de SMS, alcançou-se 32,34% de biorremediação para uma concentração inicial de 8729 mg/kg de TPH.

Diante do potencial dos fungos basidiomicetos em relação aos solos contaminados com diferentes xenobióticos é importante alavancar estudos em escala piloto e em campo, que permitam avançar nas tecnologias de micorremediação reduzindo ainda mais os custos e os tempos e aumentando a eficiência dos processos. Nesse sentido poderia se avançar na avaliação de co-cultivos de fungos basidiomicetos ou com outros fungos e/ou bactérias. É necessário também compreender melhor as possibilidades de combinação de técnicas que permitam aprofundar o conhecimento sobre os mecanismos atuantes na transformação dos contaminantes em solos com resíduos de diversos contaminantes. Pode-se sugerir, ainda, a execução de estudos de micorremediação de contaminantes emergentes, como fármacos e disruptores endócrinos, por exemplo. Por fim, são necessários mais estudos ados utilizando o SMS para a micorremediação de solos, visto o seu grande potencial.

6 CONCLUSÕES

Além do papel fundamental nos ciclos de matéria e energia na natureza, os fungos basidiomicetos podem contribuir para solucionar vários problemas ambientais da atualidade. Esses organismos são capazes de biotransformar compostos tóxicos e persistentes. No contexto da economia circular, a utilização do SMS transforma a visão desta biomassa, podendo ser considerada como um recurso reutilizável em vez de um resíduo. Seus atributos podem ser estudados em relação aos benefícios da sua adição no solo assim como na produção de enzimas com diversos fins. O SMS apresenta um grande potencial para a biorremediação de solos contaminados com compostos perigosos e poluentes recalcitrantes. Nesse sentido, a utilização do SMS se constitui como uma abordagem promissora que merece ser objeto de estudo no campo das aplicações biotecnológicas voltadas ao meio ambiente.

7 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001; DS 88887.490173/2020-00.

8 REFERÊNCIAS

- ABREU, L.P.S.; BERBERT, P.A.; TEODORO, C. E. S.; MARTINAZZO, A. P. Alternativa sustentável de uso de *Bacillus amyloliquefaciens* no biocontrole de fungos fitopatogênicos: uma revisão. **Revista de Ciências Ambientais**, v. 16, n. 1, p. 1-15, 2022.
- ABREU, J. A. S.; ROVIDA, A. F. S.; PAMPHILE, J. A. Fungos De Interesse: Aplicações Biotecnológicas Fungi of Interest: Biotechnological Applications. **Revista UNINGÁ Review**, v. 21, n. 1, p. 55–59, 2015.
- ADENIPEKUN, C. O.; OGUNJOBI, A. A.; OGUNSEYE, O. A. Management of Polluted Soils by a White-Rot Fungus: *Pleurotus pulmonarius*, **AU Journal of Technology**, v. 15, n. 1, p. 57-61, 2011.
- AKHTAR, N.; MANNAN, M. A. Mycoremediation: Expunging environmental pollutants. **Biotechnology Reports**, v. 26, n. 1, p. e00452, 2020.
- ALBERT, Q.; BARAUD, F.; LELEYTER, L.; LEMOINE, M.; HEUTTE, N.; RIOULT, J-P.; SAGE, L.; GARON, D. Use of soil fungi in the biosorption of three trace metals (Cd, Cu, Pb): promising candidates for treatment technology? **Environmental Technology (United Kingdom)**, v. 41, n. 24, p. 3166–3177, 2020.
- ANASONYE, F.; WINQUIST, E.; RÄSÄNEN, M.; KONTRO, J.; BJÖRKLÖF, K.; VASILYEVA, G.; JØRGENSEN, K. S.; STEFFEN, K. T.; TUOMELA, M. Bioremediation of TNT contaminated soil with fungi under laboratory and pilot scale conditions. **International Biodeterioration and Biodegradation**, v. 105, n. 1, p. 7–12, 2015.
- BALLAMINUT, N.; MACHADO, K. M. G.; OLIVEIRA, L. H. S.; MATHEUS, D. R. Physiological characterization of fungal inoculum for biotechnological remediation of soils. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 57, n. 4, p. 561–570, 2014.
- BARH, A.; KUMARI, B.; SHARMA, S.; ANNEPU, S. K.; KUMAR, A.; KAMAL, S.; SHARMA, V. P. Mushroom mycoremediation: Kinetics and mechanism. In: P. Bhatt. **Smart Bioremediation Technologies**. Academic Press,

2019, p. 1–22.

BELLETTINI, M. B. **Desenvolvimento de um bioprocesso integrado para valorização de bainha de pupunha (*Bactris gasipaes kunth*): produção de cogumelos (*Pleurotus spp.*) e alface (*Lactuca sativa*) cv. verônica.** 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

BENTO, C.; CASARIL, K. Agroindustriais Lignocelulósicos Por Fungos Causadores Da Podridão Branca: Uma Alternativa À Produção. **E-revista UNIOESTE**, v. 14, n. 1, p. 151–180, 2012.

BHATTACHARYA, S.; DAS, A.; MANGAI, G.; VIGNESH, K.; SANGEETHA, J. Mycoremediation of Congo red dye by filamentous fungi. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 42, n. 4, p. 1526-1536, 2011.

BHATTACHARYA, S.; DAS, A.; PRASHANTHI, K.; PALANISWAMY, M.; ANGAYARKANNI, J. Mycoremediation of Benzo[a]pyrene by *Pleurotus ostreatus* in the presence of heavy metals and mediators. **3 Biotech**, v. 4, n. 2, p. 205–211, 2014.

BOSCO, F.; MOLLEA, C. Mycoremediation in Soil. In: SALDARRIAGA-NOREÑA, H.; MURILLO-TOVAR, M. A.; FAROOQ, R.; DONGRE, R.; RIAZ, S. (Eds.) **Environmental Chemistry and Recent Pollution Control Approaches Fungi**. London: IntechOpen, 2019, p. 1-17.

BRAUN, A. B.; TRENTIN, A. W. DA S.; VISENTIN, C.; THOMÉ, A. Biorremediação Como Alternativa De Tratamento De Solos. **Ciatec**, v. 11, n. 2, p. 73–87, 2019.

CAMACHO-MORALES, R. L.; GUILLÉN-NAVARRO, K.; SÁNCHEZ, J. E. Degradation of the herbicide paraquat by macromycetes isolated from southeastern Mexico. **3 Biotech**, v. 7, n. 5, p. 1-10, 2017.

CEN, F.; CHEN, L.; HU, Y.; XU, H. Chelator-induced bioextraction of heavy metals from artificially contaminated soil by mushroom (*Coprinus comatus*). **Chemistry and Ecology**, v. 28, n. 3, p. 267–280, 2012.

CHATTERJEE, S.; SARMA, M. K.; DEB, U.; STEINHAUSER, G.; WALTHER, C.; GUPTA, D. K. Mushrooms: from nutrition to mycoremediation. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, n. 24, p. 19480–19493, 2017.

CORRAL-BOBADILLA, M.; GONZÁLEZ-MARCOS, A.; VERGARA-GONZÁLEZ, E. P.; ALBA-ELÍAS, F. Bioremediation of wastewater to remove heavy metals using the spent mushroom substrate of *Agaricus bisporus*. **Water**, v. 11, n. 3, p. 454, 2019.

DELLAMATRICE, P. M.; COSTA, L. C.; MARQUES, A. S.; VIANA, M. S.; ARAÚJO, R. S. Degradação de agrotóxicos por fungos basidiomicetos em solo agrícola contendo altos níveis de três produtos diferentes. **Pesticidas: Revista de Ecotoxicologia e Meio Ambiente**, v. 22, n. 1, p. 7–16, 2012.

DUTTA, S. D.; HYDER, S. Mycoremediation - a potential tool for sustainable management. **Journal of mycopathological research**, v. 57, n. 1, p. 25–34, 2017.

FORZZA, R. C. (Org.), et al. **Catálogo de plantas e fungos do Brasil**. Rio de Janeiro: Andrea Jakobsson Estúdio: Instituto de Pesquisa Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 2010. 871 p. Vol. 1. ISBN 978-85-8874-242-0.

ESPOSITO, E.; AZEVEDO, J. L. **Fungos**: uma introdução à biologia, bioquímica e biotecnologia. Caxias do Sul: Educs, 2004. 510p.

GIMENES, L. J. **Fungos Basidiomicetos: Técnicas de coleta, isolamento e subsídios para processos Biotecnológicos**. São Paulo: Instituto de Botânica – IBt, 2010. 19p.

GBARAKORO, T.N.; CHUKUMATI J. Short-Term Remediative Impact of Spent Mushroom Substrate on Soil Nutrients in Spent Automobile Lubricant Habitat-Types at University Farm, University of Port Harcourt, Nigeria. **International Journal of Ecosystem**, v. 9, n. 1, p. 1-5, 2019.

HE, M-Q.; HE, M-Q.; ZHAO, R-L.; LIU, D-M.; DENCHEV, T. T.; BEGEROW, D.; YURKOV, A.; KEMLER, M.; MILLANES, A. M.; WEDIN, M.; MCTAGGART, A. R.; SHIVAS, R. G.; BUYCK, B.; CHEN, J.; VIZZINI, A.; PAPP, V.; ZMITROVICH, I. V.; DAVOODIAN, N.; HYDE, K. D. Species diversity of Basidiomycota. **Fungal Diversity**, v. 114, n. 1, p. 281–325, 2022.

JUDD, W. S. **Sistemática vegetal**: um enfoque filogenético. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2009. 612p.

KRISTANTI, R. A.; HADIBARATA, T.; TOYAMA, T.; TANAKA, Y.; MORI, K. Bioremediation of crude oil by white rot fungi *Polyporus* sp. S133. **Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 21, n. 9, p. 995–1000, 2011.

LEONG, Y. K.; MA, T-W.; CHANG, J-S.; YANG, F-C. Recent advances and future directions on the valorization of spent mushroom substrate (SMS): A review. **Bioresource Technology**, v. 344, n. PA, p. 126157, 2022.

MA, X.; LI, X.; LIU, J.; CHENG, Y.; ZOU, J.; ZHAI, F.; SUN, Z.; HAN, L. Soil microbial community succession and interactions during combined plant/white-rot fungus remediation of polycyclic aromatic hydrocarbons. **Science of the Total Environment**, v. 752, n. 1, p. 142224, 2021.

MARÍN-BENITO, J. M.; SÁNCHEZ-MARTÍN, M. J.; RODRÍGUEZ-CRUZ, M. S. Impact of spent mushroom substrates on the fate of pesticides in soil, and their use for preventing and/or controlling soil and water contamination: a review. **Toxics**, v. 4, n. 3, p. 1-17, 2016.

MORAES, J. E. de; REIS, T. L.; FUZITANI, T. J.; DAMATTO JÚNIOR, E. R.; MAIOLI, E. M. T.; SOARES, W. V. B.; BUENO, M. S.; PAULINO, V. T. In natura residues from peach palm heart industry for ruminant feed. **Acta Scientiarum. Animal Sciences**, v. 44, n. 1, p. e54712, 2022.

MUSZYŃSKA, B.; ŻMUDZKI, P.; LAZUR, J.; KAŁA, K.; SUŁKOWSKA-ZIAJA, K.; OPOKA, W. Analysis of the biodegradation of synthetic testosterone and 17 α -ethynylestradiol using the edible mushroom *Lentinula edodes*. **3 Biotech**, v. 8, n. 10, p. 1–15, 2018.

NAKATSUKA, H.; ODA, M.; HAYASHI, Y.; TAMURA, K. Effects of fresh spent mushroom substrate of *Pleurotus ostreatus* on soil micromorphology in Brazil. **Geoderma**, v. 269, n. 1, p. 54-60, 2016.

OGBONNA, D. N.; NGAH, S. A.; OKPARANMA, R. N.; ULE, O.; NRIOR, R. R. Percentage bioremediation assessment of spent mushroom substrate (sms) and *Mucor racemosus* in hydrocarbon contaminated soil. **Journal of Advances in Microbiology**, v. 20, n. 12, p. 1-21, 2020.

OTHMAN, N. Z.; SARJUNI, M. N. H.; ROSLI, M. A.; NADRI, M. H.; YENG, L. H.; YING, O. P.; SARMIDI, M. R.

Spent Mushroom Substrate as Biofertilizer for Agriculture Application. In: Z. Zakaria; R. Boopathy; J. Dib. (eds). **Valorisation of Agro-industrial Residues - Volume I: Biological Approaches**. Applied Environmental Science and Engineering for a Sustainable Future. Springer, Cham, 2020. p. 37.

PEDRI, Z. C. **Uso de biomassa lignocelulósica e *Lentinula edodes* para desenvolvimento de um biocompósito**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, 2014.

PÉREZ-CHÁVEZ, A. M.; ALBERTI, M. M.; ALBERTÓ, E. Evaluation of Lignolytic Activity in Spent Mushroom Substrate from Four Cultivated Mushrooms. **Journal of Bioresources and Bioproducts**, v. 7, n. 4, p. 288-294, 2022.

PÉREZ-CHÁVEZ, A. M.; MAYER, L.; ALBERTÓ, E. Mushroom cultivation and biogas production: A sustainable reuse of organic resources. **Energy for Sustainable Development**, v. 50, n. 1, p. 50–60, 2019.

PURNOMO, A. S.; MORI, T.; TAKAGI, K.; KONDO, R. Bioremediation of DDT contaminated soil using brown-rot fungi. **International Biodeterioration and Biodegradation**, v. 65, n. 5, p. 691–695, 2011.

PURNOMO, A. S.; NAWFA, R.; MARTAK, F.; SHIMIZU, K.; KAMEI, I. Biodegradation of Aldrin and Dieldrin by the White-Rot Fungus *Pleurotus ostreatus*. **Current Microbiology**, v. 74, n. 3, p. 320–324, 2017.

RHODES, C. J. Mycoremediation (bioremediation with fungi) - growing mushrooms to clean the earth. **Chemical Speciation and Bioavailability**, v. 26, n. 3, p. 196–198, 2014.

RIBEIRO, B.; ANDRADE, P. B.; SILVA, B. M.; BAPTISTA, P.; SEABRA, R. M.; VALENTÃO, P. Comparative study on free amino acid composition of wild edible mushroom species. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 56, n. 22, p. 10973–10979, 2008.

RILEY, R.; SALAMOV, A. A.; BROWN, D. W.; GRIGORIEV, I. V. Extensive sampling of basidiomycete genomes demonstrates inadequacy of the white-rot/brown-rot paradigm for wood decay fungi. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 111, n. 27, p. 9923-9928, 2014.

ROSSIANA, N.; INDRAWATI, I.; MUSTIKA, Y. Application of Vermicompost, Spent Mushroom Substrate, Domestic Compost and Leachate as Inoculum on Bioremediation of Oil Sludge. **Journal of Petroleum & Environmental Biotechnology**, v. 8, n. 6, p. 351, 2017.

SADAÑOSKI, M. A.; TATARIN, A. S.; BARCHUK, M. C.; GONZALEZ, M.; PEGORARO, C. N.; FONSECA, M. I.; LEVIN, L. N.; VILLALBA, L. L. Evaluation of bioremediation strategies for treating recalcitrant halo-organic pollutants in soil environments. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 202, n. 1, p. 110929, 2020.

SAHITHYA, K.; MOULI, T.; ANKITA, B.; MERCY SCORLET, T. Remediation potential of mushrooms and their spent substrate against environmental contaminants: An overview, **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 42, n. 1, p. 102323, 2022.

SERBENT, M. P.; GUIMARÃES, D. K. S.; DRECHSLER-SANTOS, E. R.; HELM, C. V.; GIONGO, A.; TAVARES, L. B. B. Growth, enzymatic production and morphology of the white-rot fungi *Lentinus crinitus* (L.) Fr. upon 2,4-D herbicide exposition. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 17, p. 2995-3012, 2020.

STOKNES, K.; SCHOLWIN, F.; JASINSKA, A.; WOJCIECHOWSKA, E.; MLECZEK, M.; HANC, A.; NIEDZIELSKI, P. Cadmium mobility in a circular food-to-waste-to-food system and the use of a cultivated mushroom (*Agaricus subrufescens*) as a remediation agent. **Journal of Environmental Management**, v. 245, n. 1, p. 48–54, 2019.

TAHERAN, M.; BRAR, S. K.; VERMA, M.; SURAMPALLI, R. Y.; ZHANG, T. C.; VALERO, J. R. Membrane processes for removal of pharmaceutically active compounds (PhACs) from water and wastewaters. **Science of the Total Environment**, v. 547, n. 1, p. 60–77, 2016.

UMOR, N. A.; ISMAIL, S.; ABDULLAH, S.; HUZAIFAH, M. H. R.; HUZIR, N. M.; MAHMOOD, N. A. N.; ZHRIM, A. Y. Zero waste management of spent mushroom compost. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 23, n. 5, p. 1726–1736, 2021.

VIOTTO, R. S. **Caracterização e avaliação do resíduo de cultivo do cogumelo shiitake (*Lentinula edodes*) para fins bioenergéticos**. 2016. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Sorocaba, 2016.

WANG, C.; YU, D.; SHI, W.; JIAO, K.; WU, B.; XU, H. Application of spent mushroom (*Lentinula edodes*) substrate and acclimated sewage sludge on the bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbon polluted soil. **RSC Advances**, v. 6, n. 43, p. 37274–37285, 2016.

YOUNG, D.; RICE, J.; MARTIN, R.; LINDQUIST, E.; LIPZEN, A.; GRIGORIEV, I.; HIBBETT, D. Degradation of Bunker C Fuel Oil by White-Rot Fungi in Sawdust Cultures Suggests Potential Applications in Bioremediation. **PLoS ONE**, v. 10, n. 6, p. e0130381, 2015.

ZANG, H.; LIU, W.; CHENG, Y.; WANG, H.; AN, X.; SUN, S.; WANG, Y.; HOU, N.; CUI, C.; LI, C. Bioremediation of Historically Chlorimuron-Ethyl-Contaminated Soil by Co-Culture Chlorimuron-Ethyl-Degrading Bacteria Combined with the Spent Mushroom Substrate. **Microorganisms**, v. 8, n. 3, p. 369, 2020.

ZIED, D.C.; ZIED, D. C.; SÁNCHEZ, J. E.; NOBLE, R.; PARDO-GIMÉNEZ, A. Use of Spent Mushroom Substrate in New Mushroom Crops to Promote the Transition towards A Circular Economy. **Agronomy**, v. 10, n. 9, p. 1239, 2020.