



MICROPLÁSTICOS NO SOLO: UMA VISÃO GERAL

MICROPLÁSTICOS EN EL SUELO: UNA VISIÓN GENERAL

MICROPLASTICS IN SOIL: AN OVERVIEW

Carlos Rafael Silva de Oliveira¹; Afonso Henrique da Silva Júnior²; Patrícia Viera de Oliveira³; Leandro Pellenz⁴; Lisandro Simão⁵.

DOI: <https://doi.org/10.31692/IICIAGRO.0111>

RESUMO

Microplásticos (MPs) são poluentes emergentes reconhecidamente perigosos devido aos danos que podem causar a saúde de organismos vivos e ao meio ambiente. Dentre os diferentes ambientes em que esses poluentes foram detectados, o solo é considerado um local de ocorrência ainda pouco explorado, com grande potencial de investigação para compreensão dos reais impactos causados. A ocorrência, transporte e o impacto de MPs no solo dependem de sua morfologia, componentes químicos do solo e fatores naturais. Pesquisas na área mostraram que a combinação e interação de MPs com contaminantes absorvidos podem afetar a saúde e as funções do solo, interferindo na microbiota e desenvolvimento de animais, insetos e plantas. Portanto, o objetivo geral desta revisão é resumir a literatura atual existente acerca dos efeitos da poluição causada por MPs, destacar e discutir seu comportamento de transporte e os efeitos combinados dos MPs com outros poluentes na ecologia do solo. Dada a importância do tema e sua relação com a segurança alimentar e produção sustentável, torna-se pertinente uma abordagem informativa dos riscos potenciais que MPs no solo oferecem a sociedade.

Palavras-Chave: Microplásticos, Contaminação do solo, Poluentes emergentes.

RESUMEN

Los microplásticos (MPs) son contaminantes emergentes reconocidos como peligrosos por los daños que pueden causar a la salud de los organismos vivos y al medio ambiente. Entre los diferentes ambientes en los que se detectaron estos contaminantes, el suelo es considerado un lugar de ocurrencia aún poco explorado, con gran potencial de investigación para comprender los impactos reales causados. La aparición, el transporte y el impacto de los MPs en el suelo dependen de su morfología, los componentes químicos del suelo y los factores naturales. La investigación en el área ha demostrado que la combinación e interacción de los MPs con los contaminantes absorbidos puede afectar la salud y las funciones del suelo, interfiriendo con la microbiota y el desarrollo de animales, insectos y plantas. Por lo tanto, el objetivo general de esta revisión es resumir la literatura actual existente sobre los efectos de la contaminación causada por MPs, resaltar y discutir su comportamiento de transporte y los efectos combinados de MPs con otros contaminantes en la ecología del suelo. Dada la importancia del tema y su relación con la seguridad alimentaria y la producción sostenible, se vuelve relevante un enfoque divulgativo sobre los riesgos potenciales que los MPs en el suelo representan para la sociedad.

¹ Engenheiro Têxtil - UEM, Doutor em Engenharia Química - UFSC, carlos.oliveira@ufsc.br

² Engenheiro Agroindustrial - FURG, Doutorando em Engenharia Química - UFSC, afonso.silva@posgrad.ufsc.br

³ Engenheira Química - UFN, Doutoranda em Engenharia Química - UFSC, p.v.oliveira@posgrad.ufsc.br

⁴ Engenheiro Ambiental e Sanitarista - UFFS, Doutorando em Engenharia Química - UFSC, leandropelenz@hotmail.com

⁵ Engenheiro Ambiental e Sanitarista - UNESC, Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais - UFSC, lisandrosimao@gmail.com

Palabras Clave: Microplásticos, Contaminación del suelo, Contaminantes emergentes.

ABSTRACT

Microplastics (MPs) are emerging pollutants recognized as dangerous due to the damage they can cause to the health of living organisms and the environment. Among the different environments in which these pollutants were detected, the soil is considered a place of occurrence still little explored, with high research potential to understand the real impacts caused. MPs' occurrence, transport, and implications for soil depend on their morphology, chemical components, and natural factors. Research in the area has shown that the combination and interaction of MPs with absorbed contaminants can affect soil health and functions, interfering with the microbiota and development of animals, insects, and plants. Therefore, the general objective of this review is to summarize the current existing literature on the effects of pollution caused by MPs, highlighting and discussing their transport behavior and the combined impact of MPs with other pollutants on soil ecology. Given the importance of the topic and its relationship with food security and sustainable production, and informative approach to the potential risks that PMs in the soil pose to society becomes relevant.

Keywords: Microplastics, Soil contamination, Emerging pollutants.

INTRODUÇÃO

Plástico é um termo dado à materiais poliméricos sintéticos, que possuem alta massa molar, e podem ser encontrados em sua forma sólida nos mais diversos tipos de objetos e ambientes (ANDRADY; NEAL, 2009). Desde o surgimento desse materiais, a versatilidade de aplicações, baixo custo de obtenção e fácil processamento, foram fatores que contribuíram para o seu crescimento e ampla adoção, ao longo das últimas décadas (ANDRADY; NEAL, 2009; BARROWS; CATHEY; PETERSEN, 2018). Apesar de todas as facilidades e vantagens comerciais que os plásticos oferecem, a má gestão de seus resíduos e o descarte inadequado causam graves impactos ambientais, a longo prazo. Estima-se que a produção de plástico chegará a 33 bilhões de toneladas até 2050. No entanto, somente 55% dos plásticos produzidos no mundo são adequados para reciclagem, o que faz com que uma grande quantidade de resíduos plásticos sejam descartados no meio ambiente. (ERIKSEN et al., 2019; SHARMA et al., 2020).

A degradação de plásticos no meio ambiente é um processo muito lento, que origina continuamente microplásticos (partículas muito pequenas de plástico) com dimensões de até 5 mm. O avanço da degradação de microplásticos promove a cominuição dessas partículas, originando partículas ainda menores (dimensões nanométricas), chamados na atualidade de nanoplásticos (NPs) (HALE et al., 2020; LIU et al., 2022). Muitos pesquisadores ainda estão estudando os reais impactos ambientais e toxicologia dos NPs, que já são considerados um poluente emergente ainda mais grave quando comparado aos microplásticos (MPs), por já terem sido detectados até mesmo na corrente sanguínea de humanos e alguns animais

(CARRINGTON, 2022; LESLIE et al., 2022). Micropartículas podem facilmente serem ingeridas e inaladas por humanos e outros animais, especialmente aquáticos. A literatura científica tem reportado como os MPs podem colocar em risco a vida de seres humanos, além de representarem uma ameaça importante para todo o ecossistema terrestre devido a sua ocorrência na atmosfera, solos, rios, lagos, mares e oceanos (SENATHIRAJAH et al., 2021).

MPs presentes em corpos d'água, são ingeridos por animais aquáticos, e por sua vez, acabam no organismo de seres humanos por meio da cadeia alimentar (CARBERY; O'CONNOR; PALANISAMI, 2018). Muitas análises também relatam a ocorrência de MPs em alimentos e bebidas naturais e industrializadas (SENATHIRAJAH et al., 2021), bem como em autópsias, fezes de animais silvestres e dejetos humanos. No estudo de Senathirajah et al. (2021), os autores estimaram que seres humanos ingerem em média de 0,1 a 5 g de microplásticos semanalmente, sendo a água potável a maior fonte de ingestão dessas partículas. Outro fator bastante preocupante é a capacidade de adsorção dessas micropartículas (FRED-AHMADU et al., 2020). Numerosas pesquisas relatam o encontramento de MPs contendo agentes tóxicos e microbiológicos perigosos adsorvidos, classificando-os como veículos capazes de causar sérias doenças e até a morte de organismos vivos (FRED-AHMADU et al., 2020; SENATHIRAJAH et al., 2021). Os MPs são frequentemente reconhecidos como um “coquetel de agentes contaminantes”, em razão de sua combinação com agentes pesticidas, fármacos, metais pesados, e outros poluentes emergentes presentes na água, no solo e no ar (FRED-AHMADU et al., 2020).

Recentemente, muitos estudos provaram que o solo é um sumidouro de MPs, e a presença dessas partículas no solo representa uma séria ameaça à saúde do solo (NG et al., 2018; BOOTS; RUSSELL; GREEN, 2019; YA et al., 2021). MPs afetam as propriedades físicas e químicas do solo (por exemplo, estrutura do solo e ciclagem de nutrientes), ameaçam as atividades vitais de microrganismos, animais e insetos, promovem alterações do desenvolvimento de plantas e atividades enzimáticas do solo (DE SOUZA MACHADO et al., 2019; RILLIG; LEIFHEIT; LEHMANN, 2021). Estudos anteriores mostraram que as principais fontes de MPs no solo são as águas de lavagem doméstica, produção agrícola, desgaste de pneus, resíduos urbanos e lixo doméstico (NIZZETTO; FUTTER; LANGAAS, 2016). Em países em que é comum a irrigação do solo com esgoto urbano, a abundância de MPs nos campos agrícolas irrigados é maior em comparação aos campos agrícolas irrigados sem esgoto, o que coloca esta atividade entre as fontes que adicionam MPs no solo

(NIZZETTO; FUTTER; LANGAAS, 2016; VAN DEN BERG et al., 2020).

Notavelmente, MPs apresentam um comportamento de migração complexo em solos, tendo sido detectados em amostras de solo do mundo todo, chegando até em áreas remotas como regiões polares e montanhas (FENG et al., 2020). Uma vez que MPs penetram o solo, suas partículas permanecem migrando sob ação de fatores abióticos (porosidade, lixiviação, ciclagem de umidade, etc.) e fatores bióticos (microrganismos, minhocas, raízes, etc.) (ZHOU et al., 2020b; GAO et al., 2021).

O objetivo geral deste artigo é resumir a literatura existente sobre os efeitos da poluição de MPs no solo, destacar e discutir seu comportamento de transporte, nível de poluição e os efeitos combinados dos MPs com outros poluentes na ecologia do solo.

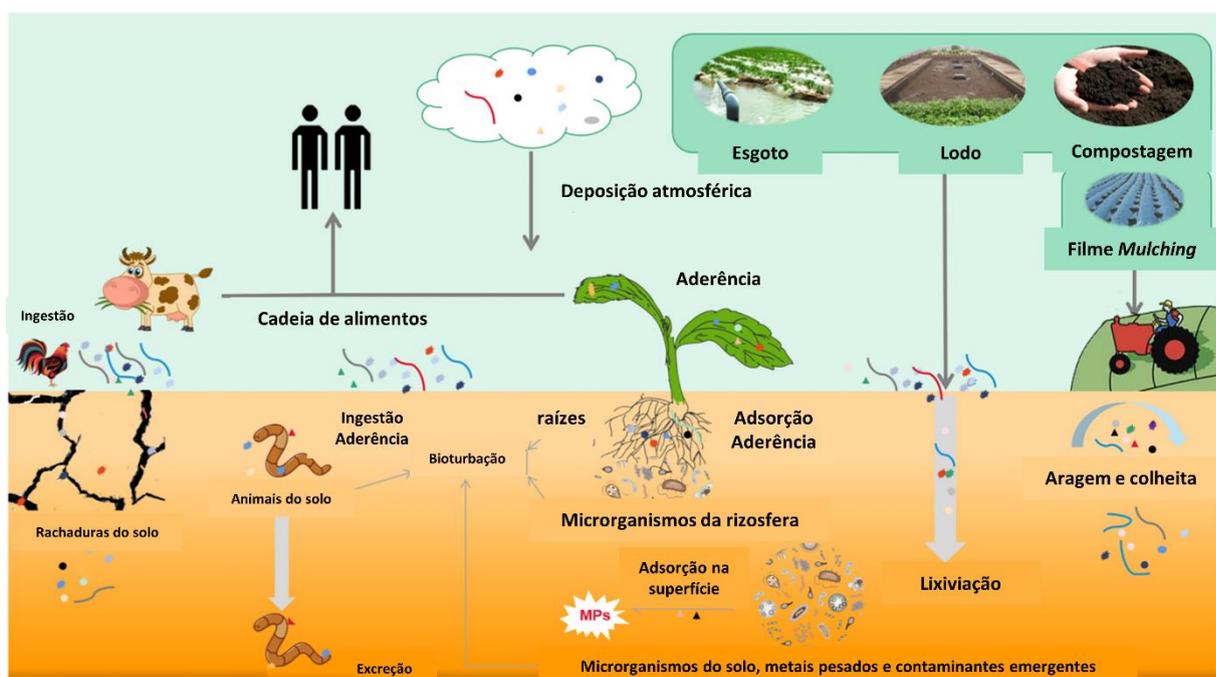
FONTES DE EMISSÃO, OCORRÊNCIA E TRANSPORTE DE MICROPLÁSTICOS NO SOLO

Os MPs entram em contato direto com o solo como materiais em macroescala (fragmentos maiores oriundos do descarte de objetos plásticos) (WANG; ZHAO; XING, 2021) ou em microescala (por exemplo, cosméticos, produtos de higiene, fibras têxteis liberadas de lavagens domésticas e industriais, etc.) (LEI et al., 2017). Atualmente, as principais fontes de MPs no solo incluem a degradação de lonas plásticas usadas em algumas culturas (filme *mulching*), aplicação de fertilizantes orgânicos, fragmentos de pneus de borracha, e lixiviados de aterro de plásticos (QI et al., 2018; OKOFFO et al., 2021). O mercado global de plásticos agrícolas foi de 4 milhões de toneladas (US\$ 10,6 milhões) em 2016, com projeção de crescimento anual de 5,6% até 2030 (HUANG et al., 2020). Segundo Zhou et al. (2020a), a taxa de recuperação de filmes plásticos do tipo *mulching* é baixa (< 60%), isto é, cerca de 40% do plástico não recuperado permanece no solo sofrendo fotodegradação lenta, o que resulta na contaminação do solo. A aplicação de fertilizantes orgânicos é outra fonte importante de MPs, isto porque a produção de compostos de fertilização do solo podem conter em sua base de formulação cerca de até 1,2 gramas de polímeros sintéticos por quilo de produto (BLÄSING; AMELUNG, 2018; WEITHMANN et al., 2018). Além disso, os MPs também podem penetrar o solo por meio da irrigação de culturas com esgoto urbano (GAO; LI; LIU, 2020), grama artificial (por exemplo, campos de futebol, *playgrounds*, etc.) (LUO et al., 2021), e deposições de resíduos secos e úmidos da atmosfera (DRIS et al., 2016) (ver Figura 1).

A distribuição espacial de MPs no solo é extremamente desigual, apresentando

diferenças regionais significativas. De acordo com Corradini et al. (2019), em uma região metropolitana do Chile, a abundância de MPs em campos agrícolas tratados sucessivamente com lodo ao longo de 10 anos, atingiu cerca de $4,1 \times 10^4$ partículas de MPs/kg de solo. No entanto, somente 0,34 partículas de MPs/kg de solo foram detectadas em terras agrícolas no leste da Alemanha (PIEHL et al., 2018). Em geral, a maior concentração de MPs ocorre em estuários, litorais, regiões agrícolas, terrenos industriais e urbanos (GAO et al., 2021; ZHANG et al., 2022). Além disso, pesquisas apontam que podem haver diferenças na abundância de MPs em uma mesma região dependendo do uso do solo. Um estudo de caso na cidade de Yeosu, na República da Coreia, revelou que a abundância de MPs foi maior em solos de tráfego (1.108 partículas/kg de solo), seguido por solo agrícola (664 partículas/kg), residencial (500 partículas/kg) chegando a solos florestais daquela região (160 partículas/kg) (CHOI et al., 2021). No sentido da profundidade do solo (perfil vertical) a distribuição e abundância de MPs também variam muito. É sabido que os MPs se acumulam com maior facilidade nas camadas superiores do solo, devido aos motivos mencionados anteriormente (ZHANG et al., 2019). O contrário ocorre a medida que aumenta a profundidade, isto é, o conteúdo de MPs diminui com o aumento da profundidade e os tamanhos de partículas em solo profundo são geralmente menores (WANG et al., 2020).

Figura 1: Distribuição e migração de microplásticos no solo.



Fonte: Reproduzido com permissão de (YANG et al., 2022), direitos autorais 2022 Elsevier.

O solo é reconhecidamente um sumidouro de pequenas partículas, em razão de sua natureza terrosa capaz de se misturar facilmente a outros materiais. Apesar de não estarem evidentes ou visíveis a olho nu, muitos materiais misturados ao solo permanecem nesses ambientes e migram por distâncias longínquas com o auxílio de águas pluviais, fluviais e subterrâneas, bem como pelo vento, insetos e animais do solo. A porosidade livre do solo aliada a difícil degradação das micropartículas de plástico fornecem as condições ideais para a migração de MPs no solo. Os MPs no solo apresentam comportamentos de migração bastante complexos, pois as partículas não apenas migram verticalmente por ação da gravidade, fluviabilidade e efeitos de lixiviação, mas também migram horizontalmente, por longas distâncias (LI; SONG; CAI, 2020; LI et al., 2021; REN et al., 2021) (ver Figura 1). O crescimento e as atividades de animais e insetos do solo (RILLIG; ZIERSCH; HEMPEL, 2017), o crescimento e transpiração das raízes das plantas (LI et al., 2021) e o fluxo microbiano (BRADNEY et al., 2019) também são considerados fatores que contribuem para a migração de MPs no solo.

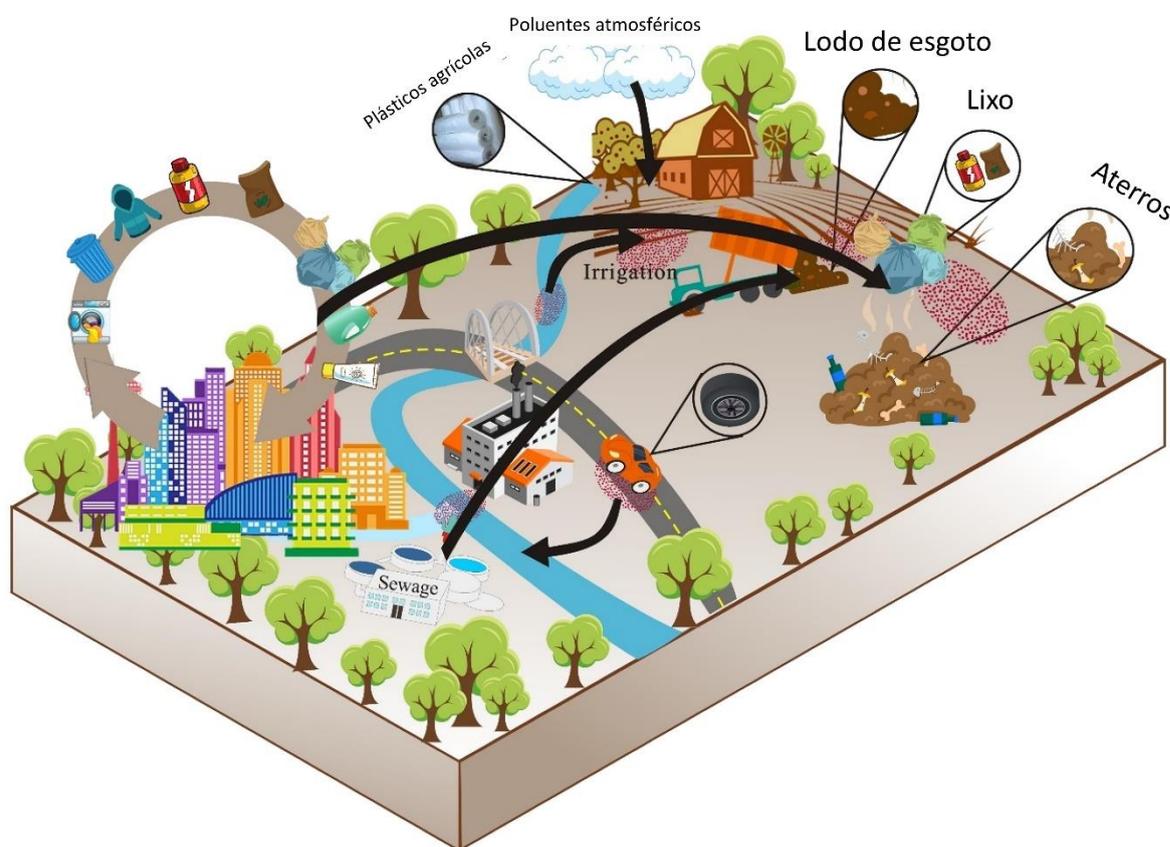
PRINCIPAIS IMPACTOS ECOLÓGICOS CAUSADOS POR MICROPLÁSTICOS NO SOLO

A presença de MPs no solo altera a estrutura e a densidade do solo, bem como os processos de evaporação e disponibilidade da água, nesse caso, a intensidade dos efeitos dependem dos tipos de MPs existentes (DE SOUZA MACHADO et al., 2019). MPs fibrosos de poliéster, por exemplo, podem alterar a porosidade do solo, mas não têm impacto significativo na densidade do solo e distribuição da água (ZHANG; ZHANG; LI, 2019). Em contrapartida, segundo Wan et al. (2019) MPs de polietileno de baixo tamanho de partícula (< 2 mm) em alta concentração (~ 1%), apresentam um impacto maior na taxa de evaporação da água do solo, aumentando a velocidade de evaporação em até 30,20%, indicando que a poluição microplástica pode ser atribuída como uma das causas de escassez de água no solo.

Além disso, de acordo com Zhang e Liu (2018), cerca de 72% dos MPs no solo estão intimamente ligados ao solo formando agregados, e o restante permanece disperso. Os autores afirmam que os MPs tendem a se agregarem com microagregados do solo contaminado, quando comparado a agregados grandes e pequenos, esse comportamento pode reduzir a estabilidade da estrutura do solo, facilitando episódios de erosão. A poluição por MPs também afeta a

aeração e permeabilidade à água, podendo inclusive levar o solo a um estado de hipóxia (baixa concentração de oxigênio capaz de crescimento de plantas e microrganismos do solo) (KELLER; JIMENEZ-MARTINEZ; MITRANO, 2020). Apesar de diferentes pesquisas mostrarem resultados que apontem explicações para as complexas consequências da contaminação do solo por MPs, a influência dos MPs no transporte e retenção de água do solo ainda precisa ser mais explorada (Ver figura 2).

Figura 2: Principais fontes de microplásticos no solo.



Fonte: Reproduzido com permissão de (YANG et al., 2021), direitos autorais 2021 Elsevier.

A figura mostra a ocorrência de microplásticos na natureza oriundos das atividades humanas a partir dos mais diversos tipos de emissão. É possível observar o caminho das micropartículas até chegarem ao solo.

A poluição por MPs afeta diretamente o desenvolvimento da vida animal no solo em muitos aspectos, como tempo de vida, crescimento e taxa de sobrevivência (WANG et al., 2021). Em razão do baixo tamanho de partícula dos MPs, esses materiais podem ser facilmente ingeridos pela fauna do solo, e acumularem-se nesses organismos chegando a afetar a saúde

humana por meio da cadeia alimentar (por exemplo, minhoca-galinha-humano) (HUERTA LWANGA et al., 2017). As minhocas são os principais animais de solos cultiváveis, e são particularmente afetadas pela poluição microplástica. Segundo Cao et al. (2017), os MPs de poliestireno (1% e 2% p/p) inibiram significativamente o crescimento de minhocas, sendo que concentrações de 2% exibiram efeito letal nas minhocas, o que foi atribuído principalmente ao fato de que a exposição aos MPs danificou seriamente o sistema de autodefesa das minhocas. Estudos mostram que microfibras plásticas (MFs) em concentrações de 0,14 a 0,71 g/kg de solo podem afetar a ingestão de alimentos e excreção de caramujos terrestres do tipo *Achatina fulica*. Em uma pesquisa, 40% de caramujos *Achatina Fulica* em solo contaminado com MFs (0,7 g/kg de solo) apresentaram lesões na parede intestinal (SONG et al., 2019). Riling e Bonkowski (2018) constataram que os MPs podem afetar os protozoários do solo (por exemplo, amebas, flagelados e ciliados). Nos estudos de Lei et al. (2018) foram listados os efeitos adversos causados por MPs na taxa de sobrevivência, desenvolvimento, redução da expectativa de vida, neurotoxicidade e dano oxidativo de *Caenorhabditis elegans*. A co-exposição a micro(nano)plásticos e pesticidas organoclorados combinados produz toxicidade crônica em *Caenorhabditis elegans*, incluindo letalidade e inibição de crescimento (LI et al., 2020). Cabe ressaltar que os MPs por alterarem o habitat desses animais, acabam por afetar diretamente a função desses animais nos processos de adubação e fertilização.

Os MPs afetam diretamente a ciclagem de carbono (C) no solo de várias maneiras, consequentemente afetam o crescimento de plantas, a microbiota e os processos de decomposição da matéria orgânica (RILLIG; LEIFHEIT; LEHMANN, 2021). Uma pesquisa descobriu que a concentração de 5% (p/p) de MPs não tem efeito relevante no Carbono Orgânico Dissolvido (COD) do solo, mas concentrações em torno de 28% (p/p) de MPs presentes podem aumentar o teor de COD no solo em ~ 35%. Os pesquisadores atribuem esse fenômeno ao acúmulo de húmus no solo provocados pela existência de MPs em grandes concentrações (REN et al., 2020). A ciclagem do nitrogênio (N) no solo também pode ser afetada pelos MPs existentes (SEELEY et al., 2020). Rong et al.(2021) investigaram os efeitos de MPs de polietilenos de baixa densidade (PEBD) na ciclagem de N do solo, e os resultados mostraram que os MPs afetaram os genes funcionais de bactérias do solo envolvidas na ciclagem de N. Os impactos na ciclagem de N do solo interferem principalmente nos processos de nitrificação e desnitrificação, promovendo um desbalanceamento das reações por meio da emissão de N₂O durante a nitrificação e inibição da emissão de N₂O durante a desnitrificação

(BARNARD; LEADLEY; HUNGATE, 2005). Em um estudo, a adição proposital de MPs no solo promoveu a fixação biológica de N da família *Burkholderiaceae* e *Pseudomonadaceae*, e na sequência, afetou o ciclo do N (FEI et al., 2020). Segundo Yan et al. (2021), os MPs também podem alterar o teor de fósforo (P) disponível no solo, por exemplo, a presença de poliestireno pode afetar o processo de absorção de P no solo (HE et al., 2021).

De acordo com Zhang et al. (2022), a presença de MPs no solo pode afetar diretamente o crescimento de plantas. Neste caso, a influência dos MPs ocorre em todo o processo de crescimento das plantas, causando uma variedade de defeitos desde a germinação das sementes, crescimento das raízes até o desenvolvimento e rendimento dos grãos (LAWREY et al., 2009). Pesquisas mostraram que MPs com diferentes concentrações (10^3 , 10^4 , 10^5 , 10^6 e 10^7 partículas/mL) e tamanhos de partículas (50, 500 e 4800 nm) inibiram a germinação de sementes de *Lepidium sativum*, tendo sido observado a diminuição na taxa de germinação com o aumento do tamanho das partículas de MPs. A razão para a inibição da germinação de sementes pode estar relacionada ao bloqueio físico dos estômatos por MPs, o que inibe a absorção de água e conseqüentemente o desenvolvimento da semente (LAWREY et al., 2009). Sabe-se que MPs dependendo do tamanho de partícula e NPs podem ser absorvidos pelas raízes das plantas e se acumularem na estrutura vegetal, causando alterações na membrana celular e estresse oxidativo ao migrarem das raízes para as partes aéreas (acima do solo) (SU et al., 2019; LUO et al., 2022), o que representa um risco a segurança alimentar.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente revisão teve por objetivo apresentar um compilado de informações acerca da origem, distribuição, migração, transformação e efeitos ecológicos dos microplásticos no solo. A contaminação do solo com MPs ocorre por meio da degradação lenta de resíduos plásticos oriundos do descarte de dejetos urbanos, aplicação de insumos agrícolas, lixiviados de aterro, entre outras fontes derivadas de atividades humanas. O solo por suas características e propriedades intrínsecas atua como um sumidouro de MPs, se misturando intimamente a esses materiais. A porosidade do solo aliada a fatores externos e climáticos favorecem a migração de MPs para lugares longínquos, chegando a lugares remotos como montanhas e regiões polares. O acúmulo de MPs no solo apresenta riscos potenciais a saúde humana e as funções do ecossistema do solo. Com base nas literaturas revisadas, é possível concluir que ainda há uma lacuna nas pesquisas sobre os efeitos ecológicos dos MPs no solo. Os impactos diretos e

indiretos de diferentes MPs (concentração, forma, tipo de polímero e biodegradabilidade) nos aspectos abióticos e bióticos do solo devem ser mais profundamente estudados para melhor avaliar os riscos ecológicos, de segurança alimentar e produção sustentável.

REFERÊNCIAS

ANDRADY, A. L.; NEAL, M. A. Applications and societal benefits of plastics. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 364, n. 1526, p. 1977–1984, 27 jul. 2009. Disponível em: <<https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rstb.2008.0304>>.

BARNARD, R.; LEADLEY, P. W.; HUNGATE, B. A. Global change, nitrification, and denitrification: A review. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 19, n. 1, mar. 2005. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1029/2004GB002282>>.

BARROWS, A. P. W.; CATHEY, S. E.; PETERSEN, C. W. Marine environment microfiber contamination: Global patterns and the diversity of microparticle origins. *Environmental Pollution*, v. 237, p. 275–284, jun. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.02.062>>.

BLÄSING, M.; AMELUNG, W. Plastics in soil: Analytical methods and possible sources. *Science of The Total Environment*, v. 612, p. 422–435, jan. 2018. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969717320843>>.

BOOTS, B.; RUSSELL, C. W.; GREEN, D. S. Effects of Microplastics in Soil Ecosystems: Above and Below Ground. *Environmental Science & Technology*, v. 53, n. 19, p. 11496–11506, 1 out. 2019. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.9b03304>>.

BRADNEY, L. et al. Particulate plastics as a vector for toxic trace-element uptake by aquatic and terrestrial organisms and human health risk. *Environment International*, v. 131, p. 104937, out. 2019. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0160412018329349>>.

CAO, D. et al. Effects of polystyrene microplastics on the fitness of earthworms in an agricultural soil. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, v. 61, p. 012148, abr. 2017. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/61/1/012148>>.

CARBERY, M.; O'CONNOR, W.; PALANISAMI, T. Trophic transfer of microplastics and mixed contaminants in the marine food web and implications for human health. *Environment International*, v. 115, n. April, p. 400–409, jun. 2018. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0160412017322298>>.

CARRINGTON, D. *Microplastics found in human blood for first time*. Disponível em: <<https://www.theguardian.com/environment/2022/mar/24/microplastics-found-in-human-blood-for-first-time>>. Acesso em: 16 jun. 2022.

CHOI, Y. R. et al. Plastic contamination of forest, urban, and agricultural soils: a case study of Yeosu City in the Republic of Korea. *Journal of Soils and Sediments*, v. 21, n. 5, p. 1962–

1973, 3 maio 2021. Disponível em: <<https://link.springer.com/10.1007/s11368-020-02759-0>>.

CORRADINI, F. et al. Evidence of microplastic accumulation in agricultural soils from sewage sludge disposal. *Science of The Total Environment*, v. 671, p. 411–420, jun. 2019. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S004896971931366X>>.

DE SOUZA MACHADO, A. A. et al. Microplastics Can Change Soil Properties and Affect Plant Performance. *Environmental Science & Technology*, v. 53, n. 10, p. 6044–6052, 21 maio 2019. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.9b01339>>.

DRIS, R. et al. Synthetic fibers in atmospheric fallout: A source of microplastics in the environment? *Marine Pollution Bulletin*, v. 104, n. 1–2, p. 290–293, mar. 2016. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0025326X16300066>>.

ERIKSEN, M. K. et al. Quality Assessment and Circularity Potential of Recovery Systems for Household Plastic Waste. *Journal of Industrial Ecology*, v. 23, n. 1, p. 156–168, 2 fev. 2019. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jiec.12822>>.

FEI, Y. et al. Response of soil enzyme activities and bacterial communities to the accumulation of microplastics in an acid cropped soil. *Science of The Total Environment*, v. 707, p. 135634, mar. 2020. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969719356293>>.

FENG, S. et al. Analysis of microplastics in a remote region of the Tibetan Plateau: Implications for natural environmental response to human activities. *Science of The Total Environment*, v. 739, p. 140087, out. 2020. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S004896972033607X>>.

FRED-AHMADU, O. H. et al. Interaction of chemical contaminants with microplastics: Principles and perspectives. *Science of the Total Environment*, v. 706, p. 135978, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135978>>.

GAO, D.; LI, X.; LIU, H. Source, occurrence, migration and potential environmental risk of microplastics in sewage sludge and during sludge amendment to soil. *Science of The Total Environment*, v. 742, p. 140355, nov. 2020. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969720338778>>.

GAO, J. et al. Vertical migration of microplastics in porous media: Multiple controlling factors under wet-dry cycling. *Journal of Hazardous Materials*, v. 419, p. 126413, out. 2021. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304389421013789>>.

HALE, R. C. et al. A Global Perspective on Microplastics. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 125, n. 1, 14 jan. 2020. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2018JC014719>>.

HE, Y. et al. Effect of microplastic particle size to the nutrients removal in activated sludge system. *Marine Pollution Bulletin*, v. 163, p. 111972, fev. 2021. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0025326X21000060>>.

HUANG, Y. et al. Agricultural plastic mulching as a source of microplastics in the terrestrial

environment. *Environmental Pollution*, v. 260, p. 114096, maio 2020. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0269749119362475>>.

HUERTA LWANGA, E. et al. Field evidence for transfer of plastic debris along a terrestrial food chain. *Scientific Reports*, v. 7, n. 1, p. 14071, 26 dez. 2017. Disponível em: <<http://www.nature.com/articles/s41598-017-14588-2>>.

KELLER, A. S.; JIMENEZ-MARTINEZ, J.; MITRANO, D. M. Transport of Nano- and Microplastic through Unsaturated Porous Media from Sewage Sludge Application. *Environmental Science & Technology*, v. 54, n. 2, p. 911–920, 21 jan. 2020. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.9b06483>>.

LAWREY, J. D. et al. High concentration of basidiolichens in a single family of agaricoid mushrooms (Basidiomycota: Agaricales: Hygrophoraceae). *Mycological Research*, v. 113, n. 10, p. 1154–1171, out. 2009. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0953756209001348>>.

LEI, K. et al. Microplastics releasing from personal care and cosmetic products in China. *Marine Pollution Bulletin*, v. 123, n. 1–2, p. 122–126, out. 2017. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0025326X17307518>>.

LEI, L. et al. Polystyrene (nano)microplastics cause size-dependent neurotoxicity, oxidative damage and other adverse effects in *Caenorhabditis elegans*. *Environmental Science: Nano*, v. 5, n. 8, p. 2009–2020, 2018. Disponível em: <<http://xlink.rsc.org/?DOI=C8EN00412A>>.

LESLIE, H. A. et al. Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood. *Environment International*, v. 163, p. 107199, maio 2022. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0160412022001258>>.

LI, H. et al. Vertical migration of microplastics along soil profile under different crop root systems. *Environmental Pollution*, v. 278, p. 116833, jun. 2021. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0269749121004139>>.

LI, J.; SONG, Y.; CAI, Y. Focus topics on microplastics in soil: Analytical methods, occurrence, transport, and ecological risks. *Environmental Pollution*, v. 257, p. 113570, fev. 2020. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0269749119335882>>.

LI, X. et al. Joint toxic effects of polystyrene nanoparticles and organochlorine pesticides (chlordane and hexachlorocyclohexane) on *Caenorhabditis elegans*. *Environmental Science: Nano*, v. 7, n. 10, p. 3062–3073, 2020. Disponível em: <<http://xlink.rsc.org/?DOI=D0EN00654H>>.

LIU, Y. et al. Uptake and translocation of nano/microplastics by rice seedlings: Evidence from a hydroponic experiment. *Journal of Hazardous Materials*, v. 421, p. 126700, jan. 2022. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304389421016654>>.

LUO, Y. et al. Quantitative tracing of uptake and transport of submicrometre plastics in crop plants using lanthanide chelates as a dual-functional tracer. *Nature Nanotechnology*, v. 17, n. 4, p. 424–431, 20 abr. 2022. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/s41565-021-01063-3>>.

LUO, Z. et al. Environmental occurrence, fate, impact, and potential solution of tire microplastics: Similarities and differences with tire wear particles. *Science of The Total Environment*, v. 795, p. 148902, nov. 2021. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969721039747>>.

NG, E.-L. et al. An overview of microplastic and nanoplastic pollution in agroecosystems. *Science of The Total Environment*, v. 627, p. 1377–1388, jun. 2018. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969718303838>>.

NIZZETTO, L.; FUTTER, M.; LANGAAS, S. Are Agricultural Soils Dumps for Microplastics of Urban Origin? *Environmental Science & Technology*, v. 50, n. 20, p. 10777–10779, 18 out. 2016. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.6b04140>>.

OKOFFO, E. D. et al. Plastic particles in soil: state of the knowledge on sources, occurrence and distribution, analytical methods and ecological impacts. *Environmental Science: Processes & Impacts*, v. 23, n. 2, p. 240–274, 2021. Disponível em: <<http://xlink.rsc.org/?DOI=D0EM00312C>>.

PIEHL, S. et al. Identification and quantification of macro- and microplastics on an agricultural farmland. *Scientific Reports*, v. 8, n. 1, p. 17950, 18 dez. 2018. Disponível em: <<http://www.nature.com/articles/s41598-018-36172-y>>.

QI, Y. et al. Macro- and micro- plastics in soil-plant system: Effects of plastic mulch film residues on wheat (*Triticum aestivum*) growth. *Science of The Total Environment*, v. 645, p. 1048–1056, dez. 2018. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969718327219>>.

REN, X. et al. Effects of microplastics on greenhouse gas emissions and the microbial community in fertilized soil. *Environmental Pollution*, v. 256, p. 113347, jan. 2020. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0269749119336152>>.

REN, Z. et al. Microplastics in the soil-groundwater environment: Aging, migration, and co-transport of contaminants – A critical review. *Journal of Hazardous Materials*, v. 419, p. 126455, out. 2021. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304389421014205>>.

RILLIG, M. C.; BONKOWSKI, M. Microplastic and soil protists: A call for research. *Environmental Pollution*, v. 241, p. 1128–1131, out. 2018. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0269749118309655>>.

RILLIG, M. C.; LEIFHEIT, E.; LEHMANN, J. Microplastic effects on carbon cycling processes in soils. *PLOS Biology*, v. 19, n. 3, p. e3001130, 30 mar. 2021. Disponível em: <<https://dx.plos.org/10.1371/journal.pbio.3001130>>.

RILLIG, M. C.; ZIERSCH, L.; HEMPEL, S. Microplastic transport in soil by earthworms. *Scientific Reports*, v. 7, n. 1, p. 1362, 2 dez. 2017. Disponível em: <<http://www.nature.com/articles/s41598-017-01594-7>>.

RONG, L. et al. LDPE microplastics affect soil microbial communities and nitrogen cycling. *Science of The Total Environment*, v. 773, p. 145640, jun. 2021. Disponível em:

<<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969721007087>>.

SEELEY, M. E. et al. Microplastics affect sedimentary microbial communities and nitrogen cycling. *Nature Communications*, v. 11, n. 1, p. 2372, 12 dez. 2020. Disponível em: <<http://www.nature.com/articles/s41467-020-16235-3>>.

SENATHIRAJAH, K. et al. Estimation of the mass of microplastics ingested – A pivotal first step towards human health risk assessment. *Journal of Hazardous Materials*, v. 404, n. PB, p. 124004, fev. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124004>>.

SHARMA, M. D. et al. Assessment of cancer risk of microplastics enriched with polycyclic aromatic hydrocarbons. *Journal of Hazardous Materials*, v. 398, n. May, p. 122994, nov. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122994>>.

SONG, Y. et al. Uptake and adverse effects of polyethylene terephthalate microplastics fibers on terrestrial snails (*Achatina fulica*) after soil exposure. *Environmental Pollution*, v. 250, p. 447–455, jul. 2019. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0269749118349480>>.

SU, Y. et al. Delivery, uptake, fate, and transport of engineered nanoparticles in plants: a critical review and data analysis. *Environmental Science: Nano*, v. 6, n. 8, p. 2311–2331, 2019. Disponível em: <<http://xlink.rsc.org/?DOI=C9EN00461K>>.

VAN DEN BERG, P. et al. Sewage sludge application as a vehicle for microplastics in eastern Spanish agricultural soils. *Environmental Pollution*, v. 261, p. 114198, jun. 2020. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0269749119368708>>.

WAN, Y. et al. Effects of plastic contamination on water evaporation and desiccation cracking in soil. *Science of The Total Environment*, v. 654, p. 576–582, mar. 2019. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969718344784>>.

WANG, C.; ZHAO, J.; XING, B. Environmental source, fate, and toxicity of microplastics. *Journal of Hazardous Materials*, v. 407, p. 124357, abr. 2021. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304389420323475>>.

WANG, J. et al. LDPE microplastics significantly alter the temporal turnover of soil microbial communities. *Science of The Total Environment*, v. 726, p. 138682, jul. 2020. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969720321999>>.

WANG, Q. et al. Interactions between microplastics and soil fauna: A critical review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, p. 1–33, 21 maio 2021. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10643389.2021.1915035>>.

WEITHMANN, N. et al. Organic fertilizer as a vehicle for the entry of microplastic into the environment. *Science Advances*, v. 4, n. 4, 6 abr. 2018. Disponível em: <<https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.aap8060>>.

YA, H. et al. Recent advances on ecological effects of microplastics on soil environment. *Science of The Total Environment*, v. 798, p. 149338, dez. 2021. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969721044119>>.

YAN, Y. et al. Effect of Polyvinyl Chloride Microplastics on Bacterial Community and Nutrient Status in Two Agricultural Soils. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, v. 107, n. 4, p. 602–609, 16 out. 2021. Disponível em: <<https://link.springer.com/10.1007/s00128-020-02900-2>>.

YANG, H. et al. Interactions of microplastics and main pollutants and environmental behavior in soils. *Science of The Total Environment*, v. 821, p. 153511, maio 2022. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969722006039>>.

YANG, L. et al. Microplastics in soil: A review on methods, occurrence, sources, and potential risk. *Science of The Total Environment*, v. 780, p. 146546, ago. 2021. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969721016144>>.

ZHANG, G. S.; ZHANG, F. X.; LI, X. T. Effects of polyester microfibers on soil physical properties: Perception from a field and a pot experiment. *Science of The Total Environment*, v. 670, p. 1–7, jun. 2019. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969719311313>>.

ZHANG, M. et al. Microplastics from mulching film is a distinct habitat for bacteria in farmland soil. *Science of The Total Environment*, v. 688, p. 470–478, out. 2019. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969719326762>>.

ZHANG, S. et al. A simple method for the extraction and identification of light density microplastics from soil. *Science of The Total Environment*, v. 616–617, p. 1056–1065, mar. 2018. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969717329339>>.

ZHANG, Z. et al. A critical review of microplastics in the soil-plant system: Distribution, uptake, phytotoxicity and prevention. *Journal of Hazardous Materials*, v. 424, p. 127750, fev. 2022. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304389421027199>>.

ZHOU, B. et al. Microplastics in agricultural soils on the coastal plain of Hangzhou Bay, east China: Multiple sources other than plastic mulching film. *Journal of Hazardous Materials*, v. 388, p. 121814, abr. 2020a. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304389419317686>>.

ZHOU, Y. et al. Microplastics in soils: A review of methods, occurrence, fate, transport, ecological and environmental risks. *Science of The Total Environment*, v. 748, p. 141368, dez. 2020b. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S004896972034897X>>.